EXOPLANETAS
Los anillos de un supersaturno

SALUD PÚBLICA
Arsénico en el agua

ENERGÍA
La falacia de la captura de carbono



Marzo 2016 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de Scientific American

El GPS del cerebro

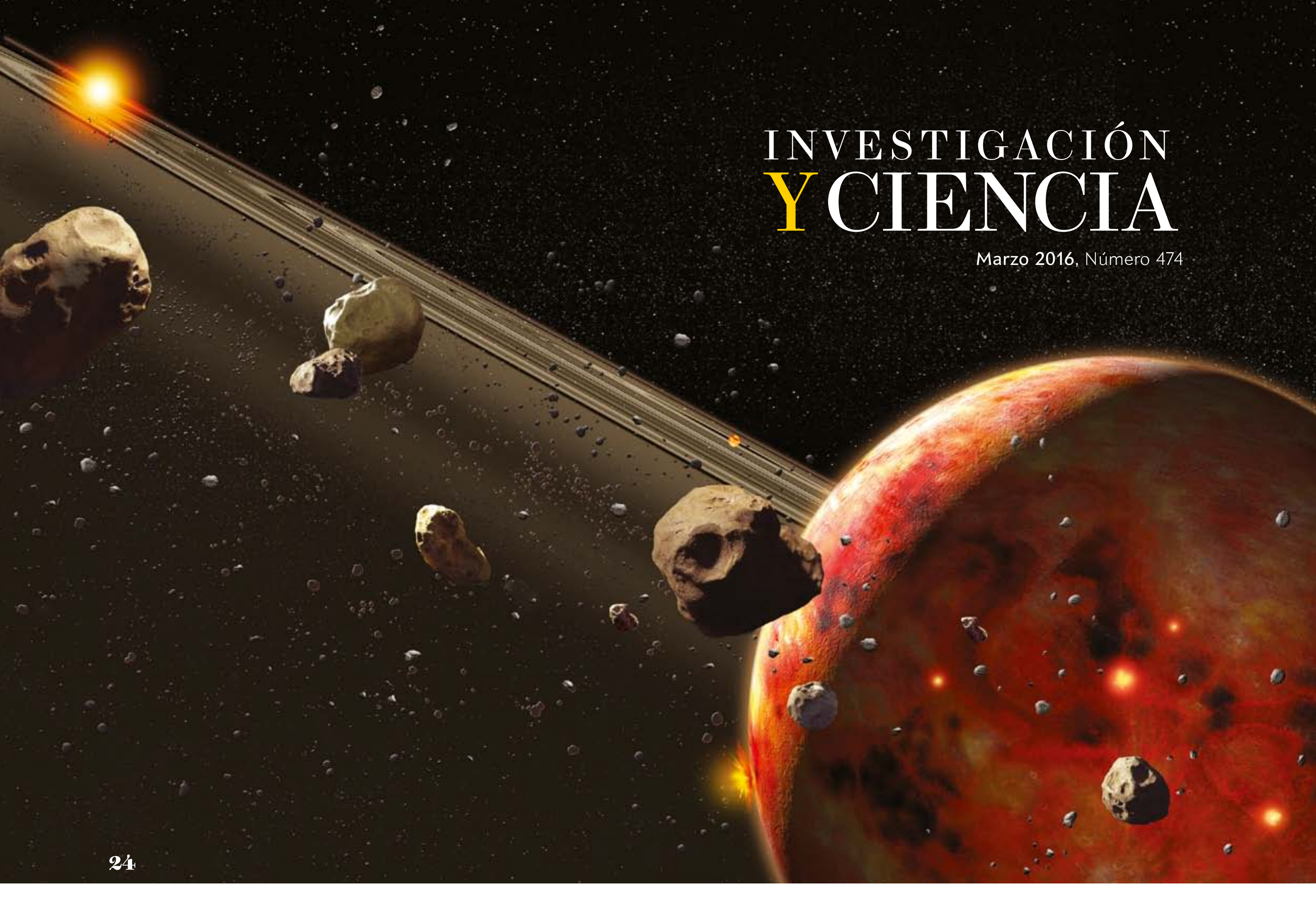
Un complejo sistema cerebral nos ayuda a orientarnos y a desplazarnos



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
EL GPS DEL CEREBRO | ARSÉNICO EN EL AGUA | LOS ANILLOS DE UN SUPERSATURNO
MARZO 2016 N.º 474

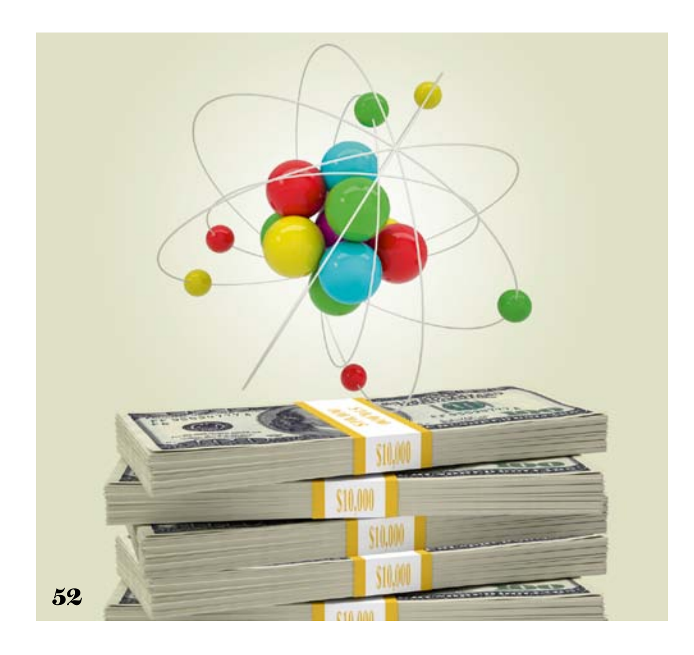

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Revista de psicología y neurociencias
Mente&Cerebro
YIHADISMO
Claves psicológicas del reclutamiento
NUEVA SERIE
Estimulación cerebral
Electricidad, campos magnéticos y ultrasonidos
Memoria
La importancia de la neurogénesis
Aprendizaje
Desarrollo del lenguaje en los bebés
Emociones
Cómo regulamos los sentimientos
Monografías de psicología y neurociencias
DERNOS
nte&Cerebro
Filosofía
Límites del reduccionismo neurobiológico



RON MILLER


8


48



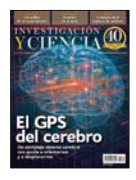
52

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Una investigación ganadora del premio Nobel ha identificado ciertas regiones del cerebro que, juntas, operan como un GPS biológico. Este sistema neuronal de posicionamiento nos permite desplazarnos con facilidad de un lugar a otro. La desorientación que sufren los pacientes con alzhéimer tal vez se produzca cuando estas áreas cerebrales se ven dañadas. Ilustración de Mark Ross.



redaccion@investigacionyciencia.es



Septiembre y noviembre 2015

ALTERNATIVAS A LA MATERIA OSCURA

El artículo «Materia oscura compleja», de Bogdan A. Dobrescu y Don Lincoln [Investigación y Ciencia, septiembre de 2015], describe distintos tipos de partículas que podrían constituir la materia oscura. Pero ¿es posible que el fenómeno no tenga que ver con la existencia de nuevas partículas? ¿Podría ocurrir que la atracción gravitatoria disminuyese con la distancia en menor grado de lo que dicta la ley de Newton, y que dicho efecto solo fuese apreciable a distancias de varios años luz? ¿Han intentado los físicos cuantificar esta posibilidad para explicar la velocidad de rotación de las galaxias sin recurrir a la materia oscura?

Martin Licka
Cornellà del Terri, Gerona

Se cree que el universo contiene más masa de la que podemos ver, y el artículo da por supuesto que esa masa adicional consta de partículas desconocidas. Pero quizá la búsqueda no debería limitarse a nuestro universo. Tal vez vivamos en un «subuniverso» con dimensiones x, y, z y t, junto al cual existen otros subuniversos extendidos a lo largo de un quinto eje, w. Un acoplamiento gravitacional débil entre estos subuniversos podría crear un aumento en la masa aparente de las estructruras del nuestro, indetectable a pequeña escala pero importante a distancias muy grandes.

David L. Krimm
Lexington, Kentucky

Responden los autores: *La propuesta de modificar las ecuaciones que relacionan fuerza e inercia (conocida como «dinámica newtoniana modificada», o MOND) permite explicar las curvas de rotación de las galaxias y otras anomalías, pero no todas. Las nuevas teorías de tipo MOND aún requieren postular una cantidad residual de materia oscura para dar cuenta de las observaciones, por lo que la hipótesis de la materia oscura explica los mismos datos con menos supuestos. Según la navaja de Occam, la teoría más simple tiene mayores probabilidades de ser correcta.*

En cuanto a la segunda pregunta, ambos autores hemos considerado en el pasado la posibilidad sugerida por el lector, pero hoy podemos decir que dicha hipótesis es falsa, al menos si la dimensión adicional es grande. Si existiesen universos paralelos como los descritos en la pregunta, cada uno de ellos constaría de cuatro dimensiones espaciales infinitas. Pero hemos medido el comportamiento dimensional de la gravedad y hemos visto que se propaga de una manera que «llena» nuestras tres dimensiones. Para simular el efecto de la materia oscura, la gravedad tendría que propagarse en las cuatro dimensiones, lo que implicaría que la fuerza gravitatoria entre dos objetos disminuiría con el cubo de la distancia.

EINSTEIN Y HILBERT

En «Einstein y la invención de la realidad» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2015], Walter Isaacson escribe: «La mañana del 18 de noviembre [de 1915], el día de la tercera conferencia, Einstein recibió el artículo de Hilbert y se vino abajo al comprobar cuánto se parecía a su propio trabajo».

He quedado extrañado de que el artículo no mencione el descubrimiento que Leo Corry, Jürgen Renn y John Stachel publicaron en 1997 en la revista *Science*, pues este choca con lo que cuenta Isaacson. Como el propio Corry explicó en Investigación y Ciencia [*véase* «Einstein, Hilbert y la teoría general de la relatividad», por Leo Corry; Investigación y Ciencia, noviembre de 1998], el estudio de los archivos de Hilbert conservados en la Universidad de Gotinga reveló diferencias fundamentales entre la primera versión del artículo que Hilbert envió a la revista de Gotinga (el 20 de noviembre de 1915) y la versión final (publicada el 31 de marzo de 1916). En concreto, el manuscrito original de Hilbert afirmaba expresamente que su teoría no podía satisfacer el requisito de covariancia general y, además, no incluía la forma final de las ecuaciones de campo. Corry y sus colaboradores mostraron que Hilbert modificó su artículo durante el proceso de corrección de pruebas y que Hilbert pudo introducir las ecuaciones definitivas después de haber leído el trabajo de Einstein.

Las diferencias entre la versión de Isaacson y la de Corry me parecen grandes para no explicarlas o justificarlas.

Sergio Miguel Tomé
Aranda de Duero, Burgos

Responde Isaacson: *El artículo de Corry, Renn y Stachel aparece citado en mi libro* [Einstein: His life and universe*; Simon & Schuster, 2007;* Einstein: Su vida y su universo*; Debate, 2008*] *y estoy muy familiarizado con él. En mi opinión la situación es compleja, y el asunto se trata en el libro con más detalle de lo que era posible en el artículo. Estoy de acuerdo en que Einstein merece el crédito de la prioridad, y mi artículo no pretendía insinuar otra cosa.*

Erratum corrige

En el artículo de Shannon May **Neutrinos tras el fondo de microondas** [Apuntes; Investigación y Ciencia, diciembre de 2015] se afirma que los neutrinos primordiales podrían explicar por qué en el universo hay «10.000 millones de partículas de materia por cada una de antimateria». En realidad, ese número corresponde al parámetro de asimetría bariónica, una cantidad relacionada pero más compleja. La frase correcta debería decir: «El estudio futuro de estos neutrinos primordiales tal vez permita explicar por qué en el universo hay muchas más partículas de materia que de antimateria».

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



EL PRECIO del petróleo sigue bajando. Pero lo que tal vez sea bueno para los propietarios de automóviles está perjudicando los planes para reducir las emisiones de carbono.


GALLERY STOCK

MEDIOAMBIENTE

El petróleo barato dificulta la captura de carbono

Se tuerce el destino de una de las técnicas con mayor potencial para luchar contra el cambio climático

En la pasada cumbre de París sobre cambio climático, los líderes mundiales hablaron largo y tendido sobre la necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la combustión de carbón, la mayor fuente de gases de efecto invernadero. Por ahora, la única forma de lograrlo sin renunciar a este combustible es la captura y almacenamiento de carbono (CAC), consistente en apartar el CO_2 de las chimeneas antes de que salga al aire y, después, enterrarlo a grandes profundidades.

Aunque casi todos los planes para mitigar el calentamiento global incluyen la CAC, hasta ahora pocos países han adoptado esta técnica, ya que la inversión requerida es alta y los incentivos, escasos. Hace años, sin embargo, EE.UU. dio con un ingenioso método para hacer rentable el proceso: vincular la CAC a la extracción de petróleo. La idea parecía funcionar, pero el hundimiento de los precios del petróleo ha puesto en peligro la CAC y, con ella, casi todos los planes para descongestionar la atmósfera.

Las primeras inyecciones de CO_2 en pozos de crudo se llevaron a cabo en 1972. El método, conocido como «extracción mejorada de petróleo», facilita que el combustible fluya y repone la presión subterránea que necesita para salir a la superficie. Además, el gas se intro-





LA COMPAÑÍA de petróleo y gas natural Denbury Resources (*izquierda*) compra dióxido de carbono a una planta de carbón cercana (*derecha*) para extraer petróleo en Misisipi.

duce en resquicios que otras sustancias auxiliares, como el agua, solo rodearían. En el proceso, parte del CO_2 queda atrapado bajo tierra. Según Richard Esposito, geólogo que ha trabajado en el desarrollo de los sistemas de CAC de la compañía eléctrica Southern Company, el CO_2 enterrado «permanecerá allí para toda la eternidad».

Julio Friedmann, alto cargo del Departamento de Energía de EE.UU., sostiene que aprovechar el CO_2 para obtener petróleo es una de las pocas maneras de hacer rentable la CAC: «La extracción mejorada de petróleo ha sido la técnica de almacenamiento dominante porque genera ingresos», razona. O, dicho de otro modo, el método cuenta con el potencial de satisfacer tanto a empresas como a ambientalistas. Las perspectivas económicas han hecho que, en las últimas décadas, hayan surgido en EE.UU. varios proyectos de extracción mejorada de petróleo. En el campo petrolífero de Tinsley, en Misisipi, la compañía de petróleo y gas natural Denbury Resources empezó a inundar los pozos con CO_2 en marzo de 2008. Hoy recicla unos 19 millones de metros cúbicos de gas al año y ha aumentado su producción de 50 a 5000 barriles diarios.

De hecho, Denbury y otras petroleras necesitan tanto CO_2 que hace poco acordaron comprar este gas a una nueva central de carbón construida en el condado de Kemper, en Misisipi: la coronación de la idea. Hoy, el CO_2 antropogénico da cuenta de en torno a una cuarta parte de todo el CO_2 que se emplea en la extracción mejorada de petróleo (el resto procede de depósitos naturales atrapados en domos geológicos).

Pero la relación entre el almacenamiento de carbono y la extracción mejorada de petróleo es frágil. La caída que desde hace unos años viene experimentando el precio del barril ha hecho que enterrar CO_2 ya no salga rentable. Según

Las recientes caídas en el precio del barril han hecho que enterrar CO_2 ya no salga rentable

Dan Cole, vicepresidente de desarrollo comercial y relaciones gubernamentales de Denbury, los bajos precios del crudo hacen más difícil que las compañías puedan reunir el dinero necesario para adquirir nueva maquinaria, como bombas, compresores y conductos especializados. La empresa Schlumberger, un gigante del sector de servicios para campos petrolíferos, ha cerrado ya su unidad de servicios de carbono, que se suponía que convertiría el CO_2 en un negocio estable. Otras firmas están pensando en tomar medidas parecidas. Tales cierres podrían minar los planes de lucha contra el calentamiento que con tanto cuidado han expuesto los recientes informes de la Agencia Internacional de la Energía y el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Al mismo tiempo, la situación tal vez sirva para subrayar lo irónico que resulta intentar salvar el planeta con medidas dependientes de la extracción de petróleo. Al fin y al cabo, al quemar el combustible adicional obtenido gracias a la inyección de CO_2, se emite más carbono, el cual acaba en la atmósfera y aviva el calentamiento.

Existen otras soluciones para rentabilizar la CAC, aunque su puesta en marcha se antoja distante. Friedmann, por ejemplo, señala que una manera de incentivar el almacenamiento subterráneo de CO_2 sería aplicar una desgravación fiscal de 50 dólares por tonelada secuestrada: «Las duras matemáticas de la acumulación atmosférica dejan claro que la CAC tiene que ser una solución para el clima». [*Véase* «La falacia de la captura de carbono», por David Biello, *en este mismo número.*]

—David Biello

ROGELIO V. SOLIS, AP PHOTO

ESPACIO

De nuevo a Marte

La Agencia Espacial Europea lanza la primera parte de una ambiciosa misión al planeta rojo

Marte se ha convertido en un cementerio de misiones robóticas: en total, 26 han fracasado en su intento de llegar al planeta rojo o no sobrevivieron al tomar tierra. Sin embargo, nada de ello ha desalentado a los ingenieros. Ahora le toca el turno a la Agencia Espacial Europea (ESA), que este mes se dispone a lanzar una ambiciosa misión al planeta vecino.

Si todo va bien, el programa ExoMars comprenderá dos viajes. La nave orbital y el módulo de aterrizaje partirán este año a bordo de un cohete ruso Protón desde el cosmódromo de Baikonur, en Kazajistán. Ambos servirán como patrulla de reconocimiento interplanetaria para el vehículo explorador, que será lanzado en 2018.

Para preparar la llegada de este último, la nave orbital y el módulo deberán completar una larga lista de objetivos. El módulo comprobará varios dispositivos clave pare el aterrizaje, como un ordenador de a bordo, un altímetro por radar y un paracaídas. Mientras tanto, la nave —la de mayor tamaño jamás enviada a Marte— orbitará alrededor del planeta a una altitud de 400 kilómetros y buscará trazas de metano y otros gases que puedan delatar la existencia de vida pasada o presente. También investigará la presencia de agua helada bajo la superficie y, algo no menos importante, posibilitará la transmisión de datos entre la Tierra y el vehículo explorador una vez que este llegue.

El vehículo de la misión ExoMars bien podría anotarse un tanto en la búsqueda de indicios de vida pasada en Marte, señala Peter Willis, científico de investigación de la misión Mars 2020, de la NASA. El robot podrá perforar hasta una profundidad de dos metros, algo nunca logrado con anterioridad, y tendrá a su disposición los instrumentos más sensibles jamás empleados para detectar señales de vida en las muestras extraídas, explica Jorge Vago, científico de proyecto de ExoMars. «Si alguna vez hubo vida en Marte, ExoMars será la primera misión con una oportunidad real de detectar los restos biológicos que haya dejado», concluye el experto.

—Jeremy Hsu





LA NAVE ORBITAL y el módulo de aterrizaje (*derecha*) de la misión ExoMars, de la ESA, partirán este mes al planeta rojo para preparar la llegada del vehículo explorador (*arriba*), prevista para 2018.

CORTESÍA DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (*vehículo explorador*); ENRICO SACCHETTI (*nave y módulo de aterrizaje*)



LOS SACOS con residuos contaminados permanecerán un tiempo indefinido en parcelas de almacenamiento temporal en Japón.

ENERGÍA

Fukushima, hoy

Un lustro después de la catástrofe nuclear, el vertido de residuos no ha cesado

Este mes se cumplen cinco años del devastador maremoto que anegó la costa nororiental de Japón y provocó el peor accidente nuclear desde Chernóbil. Una muralla de agua marina de diez metros de altura impactó contra la central nuclear de Fukushima Daiichi, la dejó sin electricidad, averió los sistemas de refrigeración y provocó el sobrecalentamiento de la mitad de los núcleos de uranio de la planta, que acabaron fundiendo las vasijas de acero que albergan los reactores. Las explosiones de hidrógeno acaecidas en los días siguientes dañaron tres de los edificios de contención y lanzaron al aire partículas radiactivas. La nube contaminante obligó a evacuar a 160.000 personas de sus hogares.

Hoy el lugar del desastre continúa inmerso en situación de crisis. La mayoría de los antiguos residentes seguramente no podrán regresar en un futuro próximo, porque los niveles de radiactividad siguen siendo altos en las proximidades. Y, aún más inquietante, la central no ha cesado de emitir peligrosos residuos nucleares. Su operador, Tokyo Electric Power Company Incorporated (TEPCO), sigue bombeando agua en las tres unidades dañadas por la fusión del núcleo para enfriarlas, generando con ello un caudal continuo de agua radiactiva. Y para colmo de males, las aguas subterráneas procedentes de una colina situada detrás de la central arrastran consigo elementos radiactivos antes de desembocar en el mar.



TEPCO canaliza el agua contaminada y la almacena en unos tanques inmensos, a razón de hasta 400 toneladas diarias. Últimamente esta agua es tratada para reducir la concentración de radionúclidos, pero sigue conservando altas concentraciones de tritio, un isótopo radiactivo del hidrógeno. Y aún está por decidir dónde se depositará con carácter definitivo. Lo mismo ocurre con los 22 millones de sacos con suelo contaminado y otros residuos sólidos generados por la catástrofe, además del uranio empleado como combustible. Los informes de salud tampoco invitan al optimismo. Se ha detectado un incremento del cáncer de tiroides en los niños que vivían en Fukushima entonces, aunque es demasiado prematuro atribuir los casos al accidente. Pese a todo, el Gobierno nipón pretende volver a poner en marcha la central. El primer ministro Shinzo Abe ha advertido de la urgencia de reanudar la actividad generadora en las demás centrales nucleares del país, que a raíz del desastre entraron en parada. Dos ya vuelven a funcionar a pleno rendimiento.

—Madhusree Mukerjee

EL DESASTRE EN CIFRAS

2020-2021
Fecha prevista para la retirada de los residuos de combustible de los reactores de Fukushima Daiichi

2051-2061
Fecha prevista para el desmantelamiento total de la central

100.000 millones de dólares
Coste del accidente hasta el momento, sin contar los costes indirectos para el sector turístico y las exportaciones agrarias

3200
Muertes por enfermedad y suicidios derivados de la evacuación

1000
Muertes predichas por los casos de cáncer ocasionados por las fugas radiactivas

FUENTES DE LAS ESTADÍSTICAS: «THE WORLD NUCLEAR INDUSTRY STATUS REPORT 2015», DE MYCLE SCHNEIDER Y ANTONY FROGGATT; JULIO DE 2015 (*cuatro primeros puntos*); «ACCOUNTING FOR LONG-TERM DOSES IN WORLDWIDE HEALTH EFFECTS OF THE FUKUSHIMA DAIICHI NUCLEAR ACCIDENT», POR JAN BEYEA ET AL., EN *ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE*, VOL. 6, 2013 (*último punto*)

AP PHOTO (*arriba izquierda*); GETTY IMAGES (*arriba derecha y abajo*)



GENÉTICA

La edición genética en los cerdos

La técnica de edición CRISPR evita una devastadora infección porcina

Una de las peores pesadillas para cualquier ganadero porcino es tener un lote infectado por el virus del síndrome reproductivo y respiratorio porcino (PRRSV). Surgido en los años ochenta del siglo XX, el síndrome afecta ahora a estos ungulados en todo el mundo, causando enfermedad, muerte y abortos. Hasta tal punto que ha sido calificado como la enfermedad porcina más importante desde el punto de vista económico. Solo en Norteamérica ocasiona pérdidas anuales por valor de 600 millones de dólares a causa de las muertes y de los costes veterinarios. La vacunación no ha podido frenar su propagación, pero una nueva estrategia concebida por biólogos de la Universidad de Misuri podría suponer un avance decisivo. Es uno de los primeros equipos que ha desarrollado una aplicación pecuaria comercial del revolucionario método de edición genética CRISPR/Cas9 para criar cerdos resistentes a la infección.

CRISPR/Cas9 es una técnica de manipulación génica que permite introducir cambios en el ADN con una precisión quirúrgica. Ha suscitado grandes expectativas en los círculos científicos porque posibilita la rápida transformación de la función de los genes y permite sustituir a métodos anteriores menos eficientes. Randall Prather, Kristen Whitworth y Kevin Wells, de la División de Ciencia Animal, han recurrido a la técnica para criar tres lechones desprovistos de una proteína celular que actúa como puerta de entrada para el virus del PRRS. Los lechones sometidos a la edición convivieron con otros siete congéneres normales en el mismo corral, y después se les inoculó a todos el virus del PRRS.

Cinco días después los cerdos ordinarios contrajeron fiebre y enfermaron, pero los genéticamente modificados permanecieron sanos durante los 35 días que duró el estudio, pese al estrecho contacto con los compañeros enfermos. Los análisis de sangre también revelaron que los cochinos editados no habían generado anticuerpos contra el virus; otra prueba de que eludieron la infección por completo. «Esperaba que los animales contrajeran el virus sin llegar a enfermar», confiesa Prather. «Pero es como el día y la noche. Vagaban de aquí para allá por el corral, con sus compañeros tosiendo por doquier y seguían frescos como una rosa.» Las conclusiones del estudio se han publicado en la revista *Nature Biotechnology*.

Ese trabajo y otros experimentos recientes auguran el papel que podría desempeñar CRISPR/Cas9 en la sanidad de los animales domésticos. A finales del año pasado, genetistas de la Universidad de California en Davis utilizaron la nueva técnica para crear vacas lecheras sin cuernos. El resultado es una gran ayuda: a las vacas se las suele descornar para evitar lesiones a los ganaderos y a las demás reses por las embestidas, pero el proceso a veces causa un dolor atroz y puede resultar peligroso para los bovinos.

Probablemente criaremos más ganado de ese modo, cree Alison Van Eenennaam, genetista que investiga la cría de vacas sin cornamenta. «Es análogo a la selección. Solo que es una selección de precisión», subraya.

—*Monique Brouillette*

CORTESÍA DE NIC BENNER, UNIVERSIDAD DE MISSOURI (*cerdos*); MUSEO DE LA CIENCIA DE VALLADOLID (*niña con araña*)

AGENDA

CONFERENCIAS

7 de marzo
Investigación espacial en altas energías. Los fenómenos más energéticos del universo
Margarida Herranz, Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña
Ciclo «Lunes de ciencia»
Residencia de Investigadores
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

10 de marzo
Dinámica no lineal, teoría del caos y sistemas complejos: Una perspectiva histórica
Miguel Ángel Fernández Sanjuán, Universidad Rey Juan Carlos
Ciclo «Ciencia para todos»
Real Academia de Ciencias
Madrid
www.rac.es > eventos

EXPOSICIONES

¿Arácnidos? ¡Sí, gracias!
Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es



OTROS

Del 14 al 20 de marzo
Semana Mundial del Cerebro 2016
Campaña global de divulgación sobre neurociencia
Numerosas actividades en todo el territorio nacional

Del 14 de marzo al 1 de abril - Jornadas
#LocosXCiencia 2016
Monólogos Big Van para estudiantes de ESO y cursos de formación de docentes
Bilbao (del 14 al 18 de marzo)
Mérida (del 28 de marzo al 1 de abril)
www.fundaciontelefonica.com

29 de marzo - Charla
Teoría de cuerdas
Fernando Marchesano, Instituto de Física Teórica UAM-CSIC
Bar de copas Moe Club
Madrid
www.facebook.com > Jam Science

OCEANOGRAFÍA

La aparente estabilidad de la materia orgánica en el océano profundo

Al contrario de lo que se pensaba, la inmensa cantidad de carbono orgánico que se acumula en las profundidades del océano es fácilmente biodegradable

JESÚS M. ARRIETA Y CARLOS M. DUARTE

Los océanos contienen unos 662.000 millones de toneladas de carbono en forma de material orgánico disuelto, una cantidad equiparable al conjunto de todos los seres vivos de la biosfera o a más de 200 veces el carbono total de todos los organismos marinos. Más del 70 por ciento de estos compuestos disueltos se concentra en aguas por debajo de los 1000 metros de profundidad, y son transportados por la circulación profunda del océano sin ser aparentemente consumidos por los microorganismos que habitan esa zona.

Así, una gran cantidad de carbono queda almacenada en el fondo del mar durante largos períodos de tiempo (siglos o milenios), sin que sea aprovechada y transformada de nuevo en dióxido de carbono por la actividad microbiana. A pesar de la aparente estabilidad de estos compuestos, en el registro geológico existen pruebas sobre variaciones en la concentración de carbono orgánico disuelto (COD) en los océanos, las cuales parecen estar asociadas a cambios rápidos en el clima de nuestro planeta. Por consiguiente, conocer los mecanismos que facilitan la persistencia del COD en el océano es una de las piezas clave para entender el ciclo global del carbono y el funcionamiento del sistema climático en nuestro planeta.

La hipótesis del material recalcitrante

Aunque el COD oceánico representa el segundo almacén de carbono orgánico más grande de la biosfera (después de la materia orgánica del suelo), las razones de la aparente estabilidad de estas moléculas no se conocen con exactitud. La mayor parte del COD marino proviene de la fotosíntesis en las aguas superficiales y, en menor medida, de aportes de sistemas terrestres. La concentración de COD decrece con rapidez con la profundidad hasta un nivel estable de aproximadamente medio miligramo de carbono por litro por debajo de los 1000 metros.

Pero, a pesar de que los valores de COD se reducen a la mitad, en comparación con los valores observados en superficie, las abundancias y tasas de crecimiento microbianas observadas en el fondo son entre 10 y 100 veces menores que las observadas en aguas superficiales. La escasa actividad microbiana y la persistencia en el tiempo del COD en el océano profundo han llevado a pensar que este material está formado por moléculas «recalcitrantes», las cuales, por su estructura química, no pueden ser degradadas por los microorganismos marinos.



TOMA DE MUESTRAS de agua con una roseta oceanográfica durante la expedición Malaspina.

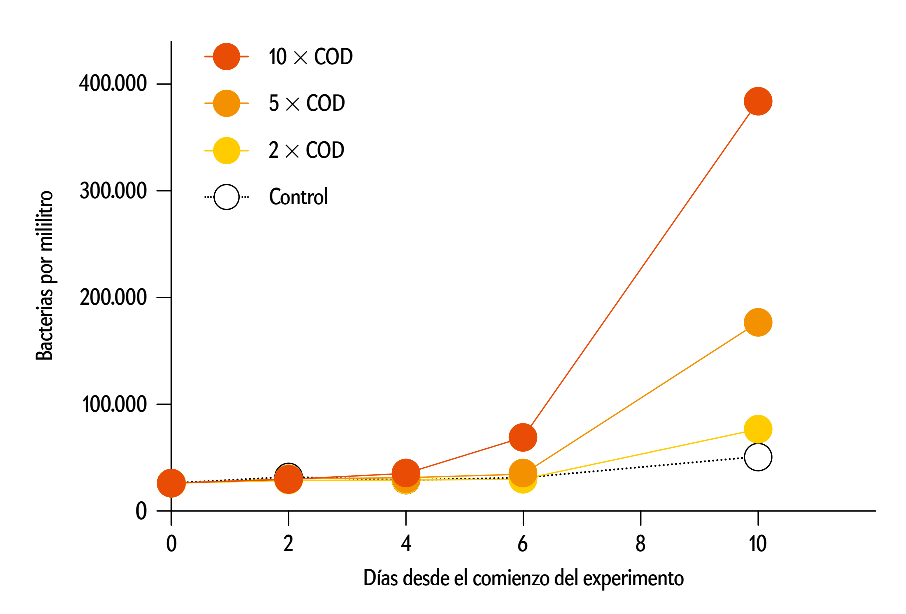
Sorprende, sin embargo, que una fuente potencial de carbono y energía de tal magnitud haya podido resistirse al empuje de la evolución y que los microorganismos hayan sido incapaces de desarrollar la maquinaria enzimática necesaria para ocupar este nicho biológico aparentemente inexplorado. Por otro lado, a pesar de que la teoría de la escasa degradación en profundidad haya sido la más aceptada durante décadas, no hay datos de ningún compuesto orgánico disuelto específico almacenado en grandes cantidades en el océano profundo, como cabría esperar tras milenios de acumulación en esa zona, ni tampoco se conoce la composición química de las supuestas sustancias recalcitrantes.

La hipótesis de la dilución

A finales de los años sesenta se planteó una hipótesis más sencilla y elegante para explicar ese enigma, aunque recibió escasa atención. Conocida como hipótesis de la dilución, proponía que el COD profundo no estaría formado por compuestos recalcitrantes, sino que sería una mezcla heterogénea de numerosos tipos de moléculas fácilmente degradables, cada una de ellas presente en muy baja concentración. Estas pequeñas concentraciones solo permitirían un consumo muy limitado por parte de los microorganismos, los cuales obtendrían una energía insuficiente para compensar el coste de sintetizar y mantener la maquinaria celular necesaria para utilizar cada uno de tales compuestos. Ello daría lugar a un consumo microbiano extremadamente lento y poco eficiente, como el observado en el océano profundo y, en consecuencia, estos materiales persistirían durante largos períodos de tiempo.

La hipótesis de la dilución, propuesta por Holger W. Jannasch en 1967, fue descartada rápidamente en favor de la hipótesis del material recalcitrante, planteada por Richard T. Barber en 1968 tras realizar un experimento sencillo y convincente. Este consistió en concentrar el material orgánico presente en muestras de agua del océano profundo hasta valores unas cinco veces superiores a los observados en la realidad e incubar estas muestras

durante meses. De esta manera, si la utilización del COD estuviera limitada por la concentración se esperaría un consumo medible de COD, mientras que si el COD fuera estructuralmente imposible de degradar no habría consumo por mucho que se incrementasen las concentraciones. Por desgracia, no pudo detectarse consumo de COD en las muestras profundas con las técnicas disponibles en aquella época. Después de la publicación de este trabajo en *Nature* en 1968, la hipótesis de la dilución fue desechada y prácticamente olvidada.



LA ABUNDANCIA DE BACTERIAS de una muestra de agua del océano profundo aumenta al hacerlo la concentración de carbono orgánico disuelto (COD). En los experimentos llevados a cabo por los autores durante la expedición Malaspina, se observó cómo incrementaba la cantidad de bacterias con valores cada vez mayores de COD extraído de la misma muestra, correspondientes a 2, 5 y 10 veces la concentración en la muestra original (control).

La expedición Malaspina

Más de cuarenta años después, la estructura química de los materiales supuestamente resistentes a la actividad microbiana seguía siendo un misterio sin resolver. La aplicación de nuevas técnicas analíticas en la primera década del siglo XXI indicaba que el COD era una mezcla compleja de varios miles de compuestos orgánicos diferentes, pero ninguno de ellos parecía especialmente difícil de degradar ni se hallaba acumulado en grandes cantidades. Había llegado el momento de repetir el experimento clásico que había llevado a descartar la hipótesis de la dilución, pero esta vez podrían realizarse mediciones con nuevas técnicas no disponibles a finales de los años sesenta.

La expedición de circunnavegación Malaspina 2010 tenía como uno de sus objetivos relevantes el estudio del océano profundo. Este gran proyecto, liderado por uno de los autores (Duarte) y con la participación de más de 400 investigadores de 18 países, pretendía evaluar el impacto del cambio global sobre el océano y explorar su biodiversidad. La expedición, que surcó los principales océanos de nuestro planeta entre diciembre de 2010 y julio de 2011 a bordo de los buques de investigación BIO Hespérides y Sarmiento de Gamboa, brindó a nuestro equipo, por entonces en el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, una oportunidad única para acceder a las aguas profundas del Pacífico y del Atlántico y revisar la hipótesis de la dilución.

En la versión actualizada del experimento evaluamos el efecto directo de la concentración sobre el crecimiento bacteriano, así como la variación en los valores de COD total. También utilizamos un concentrado de moléculas más pequeñas y más representativas del COD profundo que las que se emplearon en el experimento original y, en lugar de usar una sola concentración, estudiamos el efecto de diferentes concentraciones correspondientes aproximadamente a 1, 2, 5 y 10 veces la cantidad de COD presente en las muestras originales.

Durante la expedición Malaspina llevamos a cabo diez experimentos, cinco en el océano Pacífico y cinco en el Atlántico. En todos ellos sin excepción observamos una rápida respuesta de las bacterias al incremento en la concentración de COD. Además, tal respuesta seguía la clásica relación de Monod, es decir, el crecimiento bacteriano aumentaba según lo hacía la concentración de sustrato. Ello indicaba que el crecimiento estaba limitado por la concentración y no por las propiedades químicas del COD. A pesar de esta clara estimulación del crecimiento bacteriano, el consumo total de COD a corto plazo suponía solo una pequeña fracción del total, lo cual explicaba que no pudiera detectarse consumo con los métodos empleados en el experimento original.

Llegados a este punto, y aunque los resultados eran claros, pensamos que debían reunirse datos adicionales para rebatir de forma concluyente el paradigma establecido del material recalcitrante. En una campaña oceanográfica posterior realizada en el Atlántico Norte llevamos a cabo otros seis experimentos en los que confirmamos los resultados previos con la ayuda de otras variables nuevas. En dos de ellos utilizamos una técnica de espectrometría de masas de alta resolución (en concreto, la espectrometría de masas de resonancia ion-ciclotrón con transformada de Fourier), la cual nos permitió caracterizar varios miles de compuestos de COD y detectar cuáles habían sido consumidos. Los datos de esta segunda ronda de experimentos demostraron que la mayoría de estas moléculas eran susceptibles de ser consumidas por los microorganismos presentes en las aguas originales, es decir, no eran resistentes a la actividad microbiana. Tales resultados confirmaban que la preservación de una parte mayoritaria del COD del océano profundo se debía a las bajas concentraciones de estos compuestos, y no a su estructura recalcitrante, como se había creído hasta ahora.

Implicaciones climáticas

Nuestros resultados no modifican el balance global del ciclo del carbono ni la estimación de la cantidad del mismo almacenado en forma de COD en el océano profundo. Sin embargo, suponen un cambio drástico en cuanto al mecanismo que posibilita la persistencia a largo plazo de uno de los mayores reservorios de carbono orgánico de la biosfera.

Ello tiene implicaciones para la geoingeniería, un término que engloba diferentes propuestas de manipulación a gran

escala del clima global con el objetivo de mitigar los efectos del calentamiento, bien mediante la captura y almacenaje de CO_2 atmosférico, o bien tratando de disminuir la cantidad de energía solar absorbida por nuestro planeta. Una propuesta reciente plantea incrementar la producción microbiana de compuestos orgánicos recalcitrantes en los océanos, de modo que secuestren grandes cantidades de CO_2 atmosférico en forma de COD en las profundidades del océano. Nuestros resultados indican que, puesto que la aparente estabilidad del COD viene dada por la baja concentración, y no por su estructura recalcitrante, la capacidad de incrementar el almacenaje de COD en el océano profundo mediante este mecanismo será limitada.

En cualquier caso, la cantidad de carbono almacenada en forma de COD en el fondo del mar es enorme, por lo que modestas variaciones de esa reserva podrían tener consecuencias importantes sobre las concentraciones atmosféricas de CO_2. Por este motivo resulta necesario revaluar la capacidad real del océano de almacenar carbono en forma de COD, teniendo en cuenta que este no es intrínsecamente recalcitrante. Conocer la causa de la persistencia de COD plantea interrogantes sobre los motivos de algunas de las variaciones climáticas observadas en el registro geológico y, en consecuencia, sobre los supuestos en los que se asientan los modelos que predicen el futuro clima de nuestro planeta.

—Jesús M. Arrieta y Carlos M. Duarte
Centro de Investigación del Mar Rojo
División de Ciencia e Ingeniería Biológicas y Ambientales
Universidad de Ciencia y Tecnología Rey Abdalá. Thuwal, Arabia Saudita

PARA SABER MÁS

Growth of marine bacteria at limiting concentrations of organic carbon in seawater. H. W. Jannasch en *Limnology and Oceanography*, vol. 12, págs. 264-271, 1967.
Dissolved organic carbon from deep waters resists microbial oxidation. R. T. Barber en *Nature*, vol. 220, págs. 274-275, 1968.
Recalcitrant dissolved organic carbon fractions. D. A. Hansell en *Annual Review of Marine Science*, vol. 5, págs. 421-445, 2013.
Dilution limits dissolved organic carbon utilization in the deep ocean. J. M. Arrieta et al. en *Science*, vol. 348, págs. 331-333, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Confinamiento de los gases de invernadero. Howard Herzog, Baldur Eliasson y Olav Kaarstad en *IyC*, abril de 2000.
Profundidades oceánicas. La función de la respiración. Javier Arístegui, Carlos M. Duarte y Susana Agustí en *IyC*, junio de 2003.
Plancton bacteriano de los océanos. José M. González, Carlos Pedrós-Alió y Josep M. Gasol en *IyC*, diciembre de 2008.

BIOLOGÍA DE SISTEMAS

Hacia una teoría unificada de la criticalidad biológica

Las redes complejas pueden ser el ingrediente que falta para lograr una teoría general del comportamiento crítico en los sistemas biológicos

SERGI VALVERDE Y JORDI GARCÍA OJALVO

Uno de los grandes avances de la física del siglo xx fue el descubrimiento de que algunos procesos que tienen lugar en sistemas muy distintos, desde los fluidos hasta los imanes, entre otros muchos, siguen leyes universales; es decir, leyes que no dependen de los detalles particulares del sistema en cuestión. Durante los últimos años, el advenimiento de una visión más cuantitativa de la biología ha suscitado la pregunta de si ocurre lo mismo con los seres vivos. ¿Cabe describir el funcionamiento de los sistemas biológicos complejos, como el cerebro o una célula, a partir de una misma familia de leyes simples?

Una respuesta a esa pregunta podría hallarse en el concepto de criticalidad. Cuando un líquido se calienta, sus moléculas dejan de moverse de forma relativamente ordenada y adoptan una dinámica irregular, característica de los gases. Bajo ciertas condiciones, la transición entre tales fases de orden y desorden se produce a través de un «estado crítico», en el que el movimiento de dos moléculas cualesquiera se encuentra correlacionado con independencia de la distancia a la que se hallen. Dichas correlaciones de largo alcance implican que el sistema pierde toda escala espacial característica [*véase* «Problemas físicos con muchas escalas de longitud», por Kenneth Wilson; Investigación y Ciencia, octubre de 1979; *reeditado para* «Grandes ideas de la física», colección Temas de IyC n.º 80, 2015]. Semejante situación contrasta con el estado ordenado (en el que la correlación entre moléculas es fuerte hasta una cierta distancia, pero luego desaparece) y con el puramente desordenado (donde prácticamente no existen correlaciones a ninguna distancia).

También la vida parece situarse en ese fino límite que separa el orden del caos. En los últimos años, numerosos estudios experimentales y teóricos han sugerido que los sistemas biológicos mejoran su funcionalidad (en términos de procesamiento de la información, robustez y capacidad de evolución) cuando operan en el umbral de la criticalidad. Las neuronas del cerebro, por ejemplo, se activan cuando un estímulo externo sobrepasa cierto valor. Niveles de estimulación muy bajos dan lugar a un sistema inerte, mientras que el exceso de actividad ocasiona una sobrecarga e incluso fallos. En la frontera entre estos dos regímenes aparece un comportamiento muy similar al que se produce durante las transiciones de fase en los sistemas físicos. Varios resultados sugieren que dicha actividad crítica permite la transferencia de información a larga distancia e incrementa la capacidad del cerebro para dar una respuesta coordinada. A nivel microscópico, un

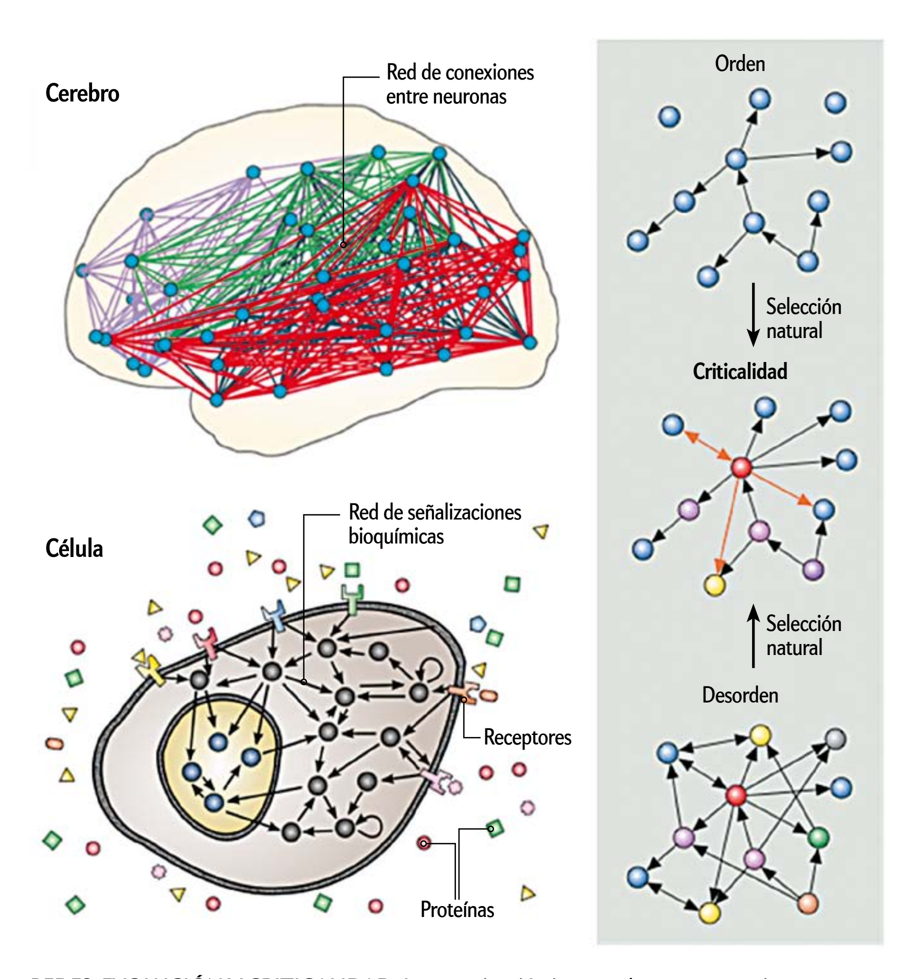
comportamiento muy parecido se observa también en las redes de biomoléculas cuyas interacciones rigen el funcionamiento de una célula.

Aunque varios estudios han intentado explicar la criticalidad biológica a partir de las características específicas de cada sistema, aún no disponemos de una teoría general que dé cuenta de este tipo de comportamiento en los seres vivos. En un artículo de revisión publicado recientemente junto con otros colaboradores en la revista *Frontiers in Physiology*, hemos reconsiderado el problema desde la perspectiva de la teoría de redes complejas. Nuestro trabajo ha abordado la relación entre estructura y dinámica en las redes neuronales y genéticas, así como las implicaciones de la teoría de redes en los mecanismos evolutivos que permiten la aparición del comportamiento crítico en los seres vivos. A continuación ofrecemos algunas reflexiones al respecto.

Criticalidad autoorganizada

En un fluido o en un material magnético, el comportamiento crítico se alcanza cuando ajustamos «a mano» algún parámetro externo, como la temperatura. En los sistemas biológicos, sin embargo, la criticalidad surge de una forma completamente distinta, ya que parece emerger por sí sola. ¿A qué se debe este fenómeno?

En 1987, los físicos Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfeld, por entonces en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Nueva York, descubrieron un mecanismo general para explicar dicho comportamiento, al que bautizaron como «criticalidad autoorganizada». Un modelo sencillo que permite entender la propuesta de Bak y sus colaboradores es una pila de arena. Al dejar caer arena sobre una superficie grano a grano, estos se acumularán y formarán un montículo cada vez mayor. Con el tiempo, sin embargo, la pila alcanzará por sí sola un punto crítico: uno en el que se tornará tan inestable que podrá desmoronarse a causa de la caída de un solo grano. Si la altura del montículo es menor que la crítica, la pila de arena continuará creciendo de manera estable; si, por algún motivo, sobrepasa dicho umbral, enseguida se desplomará. El límite entre ambos regímenes constituye un punto crítico porque, en él, la adición de un solo grano puede provocar avalanchas de todos los tamaños, desde muy pequeñas hasta muy grandes. Es decir, la dinámica del sistema pierde su escala espacial característica.



REDES, EVOLUCIÓN Y CRITICALIDAD: La organización interna de numerosos sistemas biológicos, como las neuronas del cerebro (*izquierda, arriba*) o las biomoléculas que regulan el comportamiento de una célula (*izquierda, abajo*), pueden describirse mediante redes complejas. Las simulaciones por ordenador indican que la selección natural lleva a dichas redes a regular de forma espontánea el número de conexiones hasta alcanzar un estado crítico (*derecha*). Dicho estado, semejante al que alcanzan todo tipo de sistemas físicos durante las transiciones de fase, se caracteriza por presentar correlaciones de larga distancia entre los elementos de la red, lo que favorece la propagación de la información y optimiza el funcionamiento del conjunto.

CORTESÍA DE LOS AUTORES; FIGURA ADAPTADA DE UN DISEÑO DE PAU RUÉ, UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE (*redes de biomoléculas*)

El modelo de la pila de arena proporciona un principio simple para explicar cómo las interacciones locales entre los elementos de un sistema pueden hacer que este alcance de manera espontánea el estado crítico. Sin embargo, aunque la analogía física nos ofrece un punto de vista muy atractivo para intentar entender la aparición del comportamiento crítico en los sistemas complejos, tal vez resulte demasiado simple para aplicarla a la biología.

El estudio de los sistemas vivos se enfrenta a varias dificultades. En primer lugar, los elementos constituyentes de las redes biológicas (las neuronas del cerebro o las proteínas de una célula) son muy diferentes entre sí. Además, los sistemas biológicos operan habitualmente lejos del equilibrio termodinámico y en escalas de tiempo muy diversas. ¿Cómo integrar todas estas características para extender el concepto físico de criticalidad a sistemas realmente complejos, como el cerebro o una «simple» célula?

Estructura, función y evolución

La teoría de la criticalidad autoorganizada se centra en la dinámica de los sistemas, pero no en su estructura. De hecho, las propiedades estructurales han sido poco estudiadas e incluso ignoradas por los modelos tradicionales de sistemas críticos. Creemos que, para entender el papel de la criticalidad en biología, resulta necesario afrontar la relación entre estructura y función.

La teoría de redes permite abordar estos problemas de manera unificada, ya que, en principio, la organización de un

sistema biológico siempre puede describirse en términos de una red compleja. Las redes biológicas son modulares (presentan grupos de elementos más conectados entre sí que con el resto) y muy heterogéneas. Estas propiedades podrían facilitar la emergencia del estado crítico y su conservación a largo plazo, incluso si la actividad local en diferentes partes del sistema se encuentra por encima o por debajo del punto crítico.

Varios trabajos recientes han investigado los mecanismos evolutivos que permiten la aparición de la modularidad y la heterogeneidad de las redes neuronales y genéticas. La selección natural empuja a las redes de regulación génica hacia el estado crítico debido a dos fuerzas opuestas: la conservación de funciones esenciales para el sistema y la evolución de mutaciones potencialmente beneficiosas.

Teniendo en cuenta esas dos restricciones, se puede simular por ordenador la evolución de las redes de regulación, imitando el proceso de mutación celular basado en la duplicación de genes. Los resultados indican que las redes seleccionadas se encuentran siempre en el estado crítico; es decir, dichas redes son estables y, al mismo tiempo, capaces de adaptarse a los cambios del entorno. También pueden seleccionarse redes en las que aquellos nodos que participan en funciones estables reciben nuevas conexiones. El resultado de este procedimiento es una red que, de forma espontánea, autorregula el número de conexiones promedio cerca del estado crítico.

De cara al futuro, el reto consistirá en lograr una comprensión completa acerca de cómo surge la criticalidad a partir de las propiedades estructurales (como la modularidad y la heterogeneidad) de las redes biológicas.

Las aplicaciones en el campo de la biomedicina son diversas. Este enfoque podría ayudarnos a entender los fallos cerebrales provocados por lesiones y alteraciones anatómicas, así como el desarrollo de un embrión a través de procesos de diferenciación celular, los cuales pueden ser considerados como transiciones de fase. Las modificaciones en la estructura de las conexiones entre neuronas podrían inducir un exceso de actividad en diferentes regiones del cerebro y provocar trastornos neurológicos; lo mismo puede decirse de las redes de proteínas y de los procesos de diferenciación resultantes.

Aunque aún estamos lejos de entender la emergencia de propiedades globales a partir del comportamiento colectivo, los recientes avances en el campo de las redes complejas auguran un camino prometedor.

—Sergi Valverde
Laboratorio de Sistemas Complejos
Universidad Pompeu Fabra (UPF)
Barcelona
—Jordi García Ojalvo
Departamento de ciencias experimentales y de la salud, UPF

PARA SABER MÁS

Towards a statistical mechanics of cell fate decisions. Jordi García Ojalvo y Alfonso Martinez Arias en *Current Opinion in Genetics & Development*, vol. 22, n.º 6, págs. 619-626, diciembre de 2012.

Structural determinants of criticality in biological networks. Sergi Valverde et al. en *Frontiers in Physiology*, vol. 6, art. n.º 127, mayo de 2015. Disponible en **dx.doi.org/10.3389/fphys.2015.00127**

Perspectives on theory at the interface of physics and biology. William Bialek en **arxiv.org/abs/1512.08954**, 30 de diciembre de 2015. Basado en una charla impartida en el congreso «Theory in Biology», Fundación Simons, abril de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Criticalidad auto-organizada. Per Bak y Kan Chen en *IyC*, marzo de 1991.

Complejidad en la frontera del caos. Ricard Solé, Jordi Bascompte, Jordi Delgado, Bartolo Luque y Susanna Manrubia en *IyC*, mayo de 1996.

Modelización en biología a través de escalas múltiples. Santiago Schnell, Ramón Grima y Philip Maini en *IyC*, mayo de 2007.

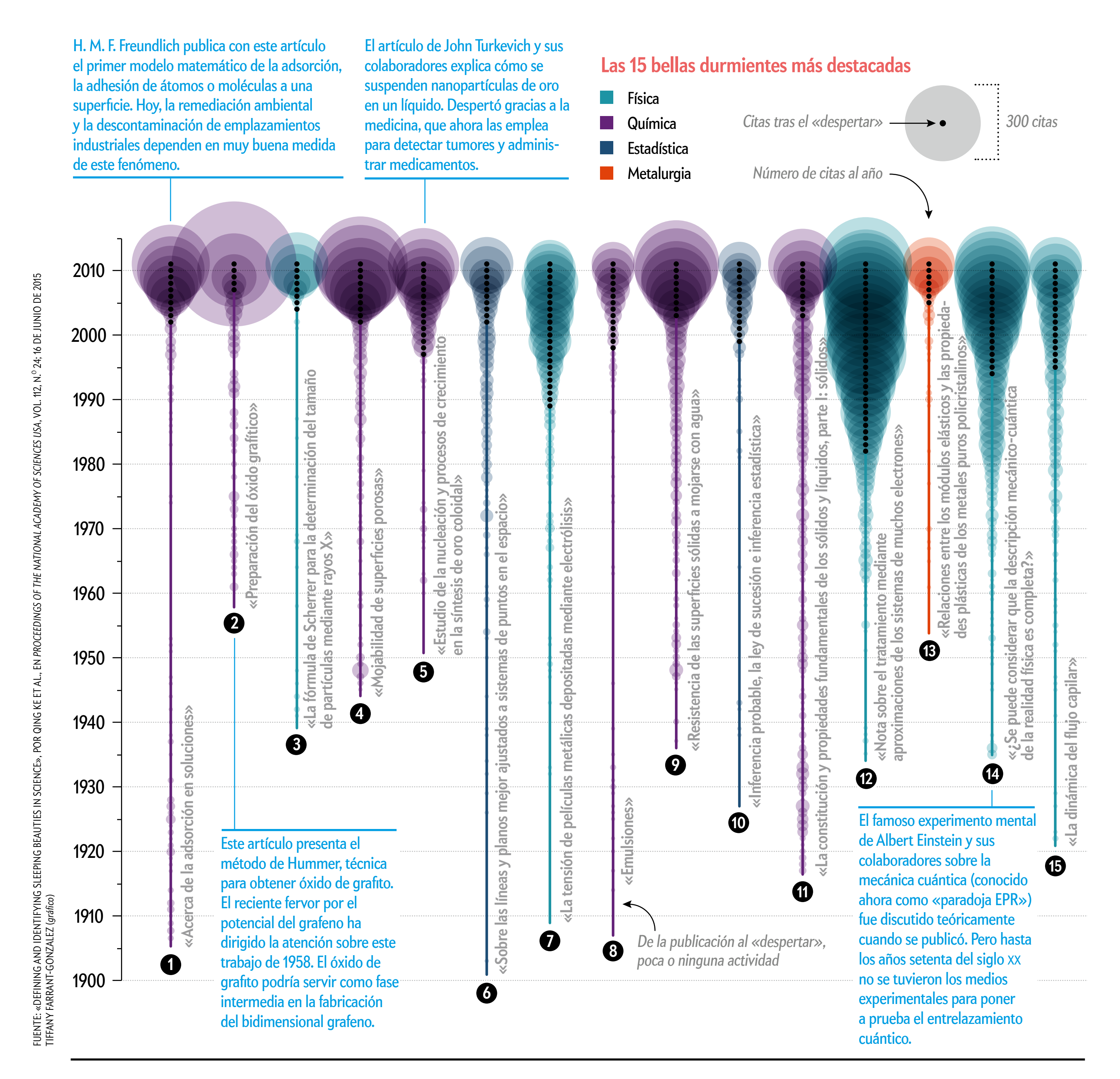
BIBLIOMETRÍA

Las bellas durmientes de la ciencia

Algunas de las mejores investigaciones permanecen olvidadas durante años

AMBER WILLIAMS

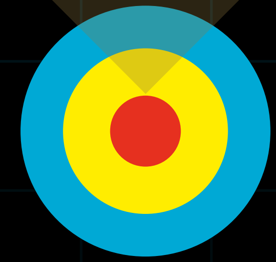
Descubrir es el meollo de la ciencia, pero redescubrir puede tener la misma importancia. Un grupo de investigadores de la Universidad de Indiana en Bloomington ha rastreado 22 millones de artículos científicos publicados a lo largo del siglo pasado y han hallado, para su sorpresa, docenas de «bellas durmientes»: estudios que pasaron desapercibidos durante años hasta que, de pronto, se reparó en ellos. Los más destacados (los que más tiempo se marchitaron en la oscuridad y luego atrajeron una mayor atención de la comunidad científica) pertenecen a la química, la física y la estadística. ¿Qué suele despertar estos hallazgos durmientes? Científicos de otras disciplinas, de la medicina por ejemplo, en busca de ideas nuevas, y la posibilidad de poner a prueba proposiciones antes solo teóricas. Qing Ke, estudiante de doctorado en informática que trabajó en el proyecto, dice que es muy probable que las bellas durmientes sean aún más comunes en el futuro como consecuencia de la disponibilidad y la accesibilidad cada vez mayores de la literatura científica.



FUENTE: «DEFINING AND IDENTIFYING SLEEPING BEAUTIES IN SCIENCE», POR QING KE ET AL., EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 112, N.º 24; 16 DE JUNIO DE 2015
TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfico*)

NEUROCIENCIA

EL GPS DEL CEREBRO



Los investigadores han comenzado a desentrañar el complejo sistema que emplea nuestro cerebro para orientarse

May-Britt Moser y Edvard I. Moser


Width= 501 Level= 203
Stu: 05695
Ser: 001/03
Ima: 008/015
S120
Signa 1.5T
R .0 mm
WINTER
TRAIL
ROAD
N
NW
NE
S
SE
P
1
2
0
Mode :
PSeq:
ST/I
TR:
TE:
256x192
FOV:
Thk:
Imgs:

VIKTOR KOEN

May-Britt Moser y **Edvard I. Moser** son catedráticos de psicología y neurociencia en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología en Trondheim y cofundadores del Instituto Kavli de Neurociencia de Sistemas y del Centro de Computación Neural de dicha universidad. En 2014 compartieron el premio Nobel de fisiología y medicina con John O'Keefe por el descubrimiento del sistema de posicionamiento del cerebro.

Nuestra pericia para conducir un coche o pilotar un avión, o hasta para caminar por las calles de una ciudad, ha cambiado radicalmente gracias a la invención del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). ¿Pero cómo nos orientábamos antes de disponer de semejante ingenio? Estudios recientes demuestran que el cerebro de los mamíferos posee un sistema de localización muy complejo, similar al GPS, para guiarnos de un lugar a otro.

A semejanza del GPS instalado en teléfonos y vehículos, el sistema cerebral evalúa dónde estamos y adónde nos dirigimos integrando múltiples señales relativas a nuestra posición y al transcurso del tiempo. El cerebro hace esos cálculos casi sin esfuerzo, sin que seamos conscientes de ello. Solo cuando nos perdemos, o cuando nuestra capacidad de orientación queda mermada por una lesión o una enfermedad neurodegenerativa, nos percatamos de la importancia capital que este sistema de cartografía y orientación tiene para la existencia.

Saber dónde estamos y adónde queremos ir es clave para la supervivencia. De otro modo, como cualquier otro animal, nos resultaría imposible hallar alimento o procrear. Pereceríamos sin remedio, y con nosotros la especie.

La complejidad del sistema de los mamíferos se hace patente cuando lo comparamos con el de otros animales. El nematodo *Caenorhabditis elegans*, que solo tiene 302 neuronas, se orienta casi en exclusiva por medio de señales olfativas, siguiendo un rastro de olor creciente o decreciente.

Los animales dotados de un sistema nervioso más complejo, como las hormigas del desierto o las abejas, hallan el camino con la ayuda de otras estrategias adicionales. Uno de tales métodos es la llamada integración de rutas, un mecanismo similar al GPS con el que las neuronas calculan la posición mediante el control constante de la dirección del animal y la velocidad del movimiento con respecto al punto de partida, una tarea que prescinde de toda referencia externa, como hitos del paisaje. En los vertebrados en general, y en los mamíferos en particular, el repertorio de comportamientos que posibilitan la autolocalización del animal en su ambiente ha ido mucho más allá.

Más que ninguna otra clase zoológica, los mamíferos son capaces de elaborar mapas neuronales del entorno, patrones de actividad eléctrica en el cerebro en los que grupos de neuronas generan potenciales de acción de una forma que refleja el trazado del entorno circundante y la posición del animal en él. Se cree que la formación de tales mapas mentales radica básicamente en la corteza, la sinuosa capa externa del cerebro que surgió en las etapas tardías de la evolución.

Durante las últimas décadas hemos presenciado grandes avances en el conocimiento de cómo el cerebro forma y revisa esos mapas a medida que el animal se mueve. Investigaciones recientes, mayoritariamente con roedores, han revelado que los sistemas de orientación los integran diversos tipos de células especializadas que calculan continuamente la ubicación del animal, la distancia recorrida, la dirección de desplazamiento y la velocidad. Actuando colectivamente, estas células crean un mapa dinámico del espacio circundante que, además de operar en el acto, puede ser almacenado en la memoria para su uso posterior.

UNA NEUROCIENCIA DEL ESPACIO

El estudio de los mapas espaciales del cerebro lo inició Edward C. Tolman, catedrático de psicología en la Universidad de California en Berkeley, entre 1918 y 1954. Antes de sus trabajos, los

EN SÍNTESIS

Saber dónde estamos en relación con nuestro entorno (calles, árboles u otros puntos de referencia en derredor) es una habilidad tan capital que sin ella nuestra supervivencia como individuos y como especie correría serio peligro.

Redes de neuronas situadas en lo más profundo del cerebro cooperan para crear un mapa mental del entorno que nos permita trazar el trayecto de un lugar a otro, como un auténtico análogo biológico del Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

Las regiones del cerebro involucradas en la búsqueda de rutas están íntimamente ligadas con la formación de recuerdos nuevos. Cuando esos circuitos neuronales fallan sobreviene la desorientación que caracteriza a los enfermos de alzhéimer.

experimentos con ratas de laboratorio parecían indicar que los animales hallan su camino en respuesta a estímulos sucesivos que encuentran a lo largo del recorrido. Como parte del aprendizaje para recorrer un laberinto eran capaces de recordar las secuencias de giros dados desde el principio hasta el final. Sin embargo, esta idea no contemplaba que pudieran visualizar una imagen del laberinto entero para planificar la mejor ruta.

Tolman rompió radicalmente con el punto de vista predominante. Había observado que las ratas toman atajos o dan rodeos, actitudes que no cabría esperar si solo hubieran aprendido una larga secuencia de comportamientos. A partir de sus observaciones, propuso que los animales creaban mapas mentales del entorno que recogen la geometría espacial del mundo exterior. Esos mapas cognitivos servían para mucho más que encontrar el camino; aparentemente también registraban información acerca de los acontecimientos vividos en escenarios concretos.

Las ideas de Tolman, propuestas por vez primera alrededor de 1930, fueron motivo de controversia durante décadas. Esa tardanza en ser aceptadas se explica en parte porque estaban basadas enteramente en la observación de comportamientos de los animales de laboratorio que se prestaban a diversas interpretaciones. Tolman carecía de los conceptos y los instrumentos adecuados para analizar si el cerebro animal albergaba un mapa del entorno.

Hubieron de pasar cuarenta años antes de que los estudios de actividad neuronal brindaran una prueba directa de ese mapa. En la década de los cincuenta el progreso en el campo de los microelectrodos hizo posible la monitorización de la actividad eléctrica de neuronas individuales en animales despiertos. Estos electrodos sumamente delgados posibilitaron detectar el impulso de una sola neurona mientras el animal andaba ocupado en sus actividades. La célula nerviosa se activa cuando alcanza un potencial de acción (un cambio súbito de voltaje a lo largo de la membrana celular). Los potenciales de acción provocan la liberación de moléculas neurotransmisoras que transmiten señales de una neurona a otra.

John O'Keefe, del Colegio Universitario de Londres, empleó microelectrodos para monitorizar los potenciales de acción en el hipocampo de ratas, una región del cerebro cuya importancia para la memoria se conoce desde hace décadas. En 1971 anunció que las neuronas del hipocampo se activaban cuando la rata permanecía un tiempo en una cierta posición dentro del habitáculo y por eso las bautizó células de ubicación. O'Keefe se percató de que cada vez que el roedor cambiaba de lugar se activaban neuronas distintas y que el patrón de activación de esas neuronas de ubicación perfilaba en conjunto un mapa de posiciones repartidas por el recinto. La actividad colectiva de dichas neuronas captada a través de los electrodos permitía deducir la posición exacta del roedor en un momento dado. En 1978, O'Keefe y su colega Lynn Nadel, actualmente en la Universidad de Arizona, sugirieron que las neuronas de ubicación eran parte integrante del mapa cognitivo que Tolman había vaticinado.

BRÚJULAS DE LA NATURALEZA

La prodigiosa destreza del cerebro para hallar el camino

La supervivencia de cualquier ser vivo requiere la capacidad de percibir el entorno y de calcular, aunque sea de forma rudimentaria, dónde ha estado, dónde está y adónde va. En los eslabones superiores de la cadena evolutiva, muchas especies han ideado sistemas de «integración de rutas» que ejecutan esta tarea sin necesidad de reparar en hitos externos para conocer su paradero. Los mamíferos han apostado por una solución aún más elaborada, a base de mapas mentales internos.

Rastrear olores
El nematodo *Caenorhabditis elegans* posee quizás el sistema de orientación animal más elemental. El mundo de este gusano simple gira en torno al olfato. Dotado con apenas 302 neuronas, se abre paso hacia las fuentes de alimento al captar un olor de intensidad creciente.

GPS interno
La evolución ha dotado a ciertos insectos y otros artrópodos con una elaborada capacidad de integración de rutas. Pueden monitorizar internamente su velocidad y su rumbo con respecto a un punto de partida. Ello les permite deducir la forma más eficiente de recorrer un trayecto (un retorno directo en lugar del sinuoso recorrido inicial).

Mapas mentales
Los mamíferos han desarrollado aptitudes de orientación aún más complejas en las que las neuronas se activan en secuencias definidas que reflejan las rutas que recorren. Estas redes neuronales conforman mapas mentales del mundo físico. Los desplazamientos pasados quedan almacenados en forma de recuerdos, listos para servir en la planificación de futuros trayectos.

JEN CHRISTIANSEN

UN MAPA CORTICAL

El descubrimiento de las neuronas de ubicación abrió una ventana a las regiones más profundas de la corteza, a las zonas más alejadas de las cortezas sensoriales (receptoras de información de los sentidos) y de la corteza motora (emisora de las señales que inician o controlan el movimiento). A finales de los sesenta, cuando O'Keefe inició su labor, el conocimiento acerca del momento en que las neuronas se activaban o permanecían inactivas estaba circunscrito en gran parte a las cortezas sensoriales

primarias, cuya actividad neural depende directamente de los estímulos sensoriales como la luz, el sonido o el tacto.

Los neurocientíficos de entonces suponían que el hipocampo estaba demasiado apartado de los órganos sensoriales como para que el registro de sus señales a través de los microelectrodos resultara fácilmente comprensible. El descubrimiento de las neuronas hipocámpicas que creaban un mapa del entorno inmediato del animal echó por tierra esa suposición.

A pesar de lo extraordinario del descubrimiento, décadas después nadie sabía aún qué papel concreto desempeñaban las neuronas de ubicación en la orientación. Se conocía su localización en un área del hipocampo llamada CA1, el destino final de una cadena de señales originada en otro punto del hipocampo. Se planteó que recibían muchos de los cómputos críticos para la orientación procedentes de otras regiones hipocámpicas. A comienzos de los años 2000, ambos decidimos explorar esta idea en profundidad en el nuevo laboratorio que habíamos creado en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología en Trondheim. Esta búsqueda condujo a un descubrimiento muy importante.

En colaboración con Menno Witter, hoy en nuestro instituto, y un grupo de ingeniosos estudiantes, comenzamos a implantar microelectrodos en ratas para monitorizar la actividad de las neuronas de ubicación del hipocampo después de haber desconectado parte de un circuito neuronal del mismo que suministra información a estas células. Con ello esperábamos confirmar la importancia de ese circuito para el correcto funcionamiento de las neuronas de ubicación. Para sorpresa nuestra, las neuronas del extremo del circuito, situadas en el CA1, seguían generando potenciales de acción cuando el roedor ya había llegado a ciertos lugares.

La conclusión ineludible fue que las células de ubicación no dependían de ese circuito hipocámpico para determinar el rumbo. Entonces nuestra atención se volcó hacia la única vía neuronal que habíamos dejado intacta en el experimento: la conexión directa entre el CA1 y la corteza entorrinal, un área colindante que actúa de interfaz con el resto de la corteza.

En 2002, aún en colaboración con Witter, insertamos microelectrodos en la corteza entorrinal y comenzamos a tomar registros cuando el animal ejecutaba tareas similares a las que usamos en los estudios de las neuronas de ubicación. Guiamos los electrodos hacia una región de esa corteza que mantiene conexiones directas con las áreas del hipocampo en que las neuronas de ubicación habían sido registradas en casi todos los estudios precedentes. Muchas neuronas de la corteza entorrinal se activaban cuando el roedor ocupaba un punto concreto del recinto, a semejanza de las neuronas de ubicación en el hipocampo. Pero a diferencia de estas, cada neurona de la corteza entorrinal no lo hacía en uno solo de los puntos visitados, sino en muchos.

Pero lo más sorprendente de ellas era la forma en que se activaban. Su patrón de impulsos solo se hizo patente cuando, en 2005, ampliamos el habitáculo en el que tomábamos registros. Tras la ampliación hasta cierto tamaño, descubrimos que los lugares en que cada neurona entorrinal se activaba formaban los vértices de un hexágono. La neurona, a la que llamamos célula de retícula, se activaba cuando el animal pasaba sobre cada vértice.

Era como si los hexágonos, que abarcaban todo el recinto, formasen las unidades de una retícula (a semejanza de los cuadrados delimitados por las líneas de coordenadas en un mapa de carreteras). El patrón de descarga planteaba la posibilidad de que las neuronas de retícula, a diferencia de las de ubicación, proveyeran información acerca de la distancia y la dirección, ayudando al animal a seguir su trayectoria a partir de claves internas del movimiento del cuerpo sin depender de referencias del entorno.

Varios aspectos de la retícula cambiaron cuando examinamos la actividad neuronal en distintas zonas de la corteza entorrinal. En el área dorsal, cerca de la parte superior de esta estructura, las células generaban una tupida retícula hexagonal del recinto. El tamaño de los hexágonos crecía de manera gradual, modularmente, conforme nos desplazábamos de la parte superior de la corteza entorrinal a la inferior o ventral. Los elementos hexagonales de la retícula en cada módulo estaban separados por la misma distancia.

Se pudo calcular el espaciado de las neuronas de retícula en cada uno de los sucesivos módulos al desplazarse hacia abajo multiplicando la distancia entre las neuronas del módulo anterior por un factor aproximado de 1,4, que viene a ser la raíz cuadrada de 2. En el módulo de la parte superior de la corteza entorrinal, la rata que activaba la neurona de retícula situada en un vértice del hexágono tenía que recorrer entre 30 y 35 centímetros hasta llegar al vértice colindante. En el siguiente módulo inferior, tenía que moverse entre 42 y 49 centímetros, y así sucesivamente. En el módulo más bajo, la distancia se alargaba hasta varios metros.

Las neuronas de retícula y su metódica organización nos causaron una honda impresión. En casi toda la corteza las neuronas muestran patrones de activación que parecen caóticos e inescrutables, pero aquí, inmerso en sus profundidades, había un sistema de neuronas dotado de un patrón predecible y ordenado. Estábamos ansiosos por seguir indagando y las nuevas sorpresas no tardaron en llegar: las neuronas de retícula y de ubicación no eran las únicas artífices de la orientación en los mamíferos.

Entre mediados de los ochenta y comienzos de los noventa, James B. Ranck, del Centro Médico Downstate de la Universidad estatal de Nueva York y Jeffrey S. Taube, actualmente en el Colegio Dartmouth, habían descrito neuronas que actuaban cuando un roedor encaraba una dirección concreta. Ranck y Taube habían descubierto las neuronas de orientación de la cabeza en el presubículo, otra región de la corteza adyacente al hipocampo.

Descubrimos que esas células también estaban presentes en la corteza entorrinal, entremezcladas con las neuronas de retícula. Muchas funcionaban como las neuronas de retícula entorrinales: los lugares del recinto donde se activaban también trazaban una red, pero solo lo hacían en esos puntos si la rata tomaba cierta dirección. Hacían las veces de brújula: si se monitorizaban las neuronas se podía saber la dirección tomada por el roedor en un momento dado en relación con el entorno circundante.

Años después, en 2008, descubrimos en la corteza entorrinal otro tipo de células, las neuronas de límite. Estas se activaban siempre que el animal se aproximaba a un obstáculo, ya fuera una pared del recinto o cualquier otra separación. Parecían calcular la distancia que separaba el animal del límite, información que además aprovechaban las neuronas de retícula para estimar la distancia recorrida desde la pared y podía quedar grabada como punto de referencia para recordar la ubicación del obstáculo posteriormente.

Finalmente, en 2015, entró en escena un cuarto tipo de neurona. Respondía solo a la velocidad de desplazamiento, sin tener en cuenta la localización o la dirección del roedor. Las tasas de descarga de estas neuronas aumentaban en consonancia con la velocidad de marcha. De hecho, era posible saber el ritmo de

avance de la rata mirando las tasas de descarga de un puñado de estos velocímetros celulares. Junto con las neuronas de orientación de la cabeza, este último tipo facilitaría continuamente a las neuronas de retícula información actualizada del movimiento del animal: velocidad, dirección y distancia al punto de partida.

DE LAS NEURONAS DE RETÍCULA A LAS DE UBICACIÓN

El descubrimiento de las neuronas de retícula excedió con creces nuestro deseo de revelar la información con la que las neuronas de ubicación dibujan una imagen interna del entorno en los mamíferos. Ahora sabemos que las células de ubicación integran las señales de varios tipos de neuronas de la corteza entorrinal, con las que el cerebro intenta conocer el recorrido del animal y el lugar de destino. Pero estos procesos no acaban de explicar cómo se orienta un mamífero.

Nuestro trabajo inicial se centró en la corteza entorrinal medial (interna), pero las neuronas de ubicación también podrían recibir señales de la corteza entorrinal lateral que retransmite las señales procesadas por diversos sistemas sensoriales, entre ellas la información vinculada con el olor y la identificación de los objetos. Al integrar los datos de la corteza entorrinal medial y lateral, las neuronas de ubicación interpretan señales procedentes de todo el cerebro. La compleja interacción de mensajes que recibe el hipocampo y la formación de recuerdos específicos de localización que esto permite son objeto de estudio en nuestro laboratorio, y sin duda restan muchos años de labor por delante.

Un modo de comenzar a entender cómo se combinan los mapas espaciales de la corteza entorrinal medial y del hipocampo para asistir en la orientación es preguntarse en qué se diferencian los mapas. John Kubie y el ya fallecido Robert U. Muller, ambos del Centro Médico Downstate de la Universidad estatal de Nueva York, demostraron en los ochenta que los mapas del hipocampo trazados por las neuronas de ubicación pueden cambiar completamente cuando el animal se desplaza a un nuevo entorno, incluso a un recinto situado en el mismo lugar y en la misma sala pero coloreado de otro color.

Los experimentos llevados a cabo en nuestro laboratorio, que implicaban la búsqueda de comida en hasta 11 recintos situados en salas diferentes, han demostrado que las ratas crean de inmediato un mapa propio para cada sala, hecho que refuerza la hipótesis de que el hipocampo crea mapas espaciales adaptados a entornos específicos.

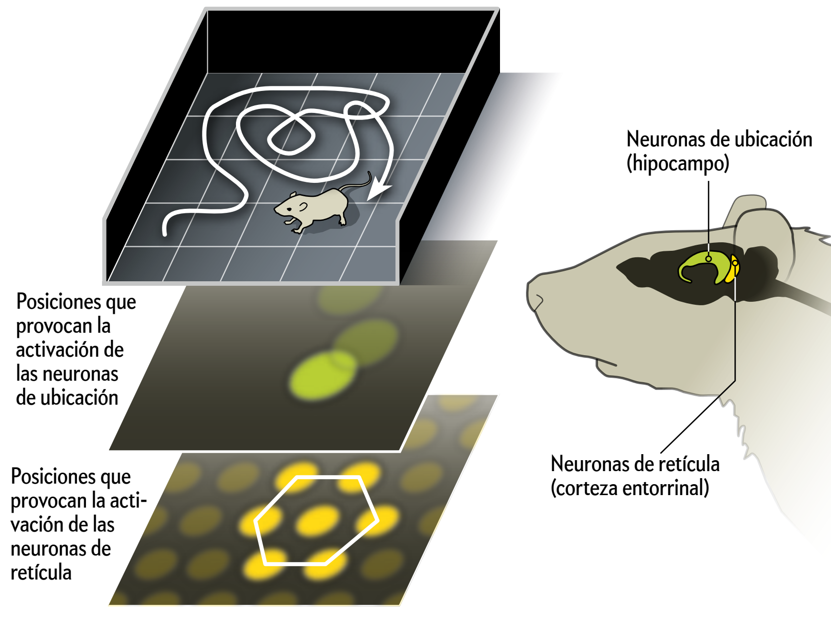
En contraste, los mapas de la corteza entorrinal medial son universales. Las neuronas de retícula (así como las de orientación de la cabeza y las de límite) que se activan a la vez en un número concreto de ubicaciones en el mapa reticulado de un entorno, también lo hacen en posiciones análogas en el mapa de otro entorno (como si las líneas de latitud y longitud del primer mapa se calcaran en el nuevo escenario). La secuencia de neuronas que entra en acción cuando el roedor se mueve hacia el nordeste en un espacio de la jaula se repite cuando se desplaza en la misma dirección en otro espacio. El patrón de señales intercambiado entre estas neuronas de la corteza entorrinal es lo que el cerebro usa para orientarse por los alrededores.

Además, la corteza entorrinal transmite esos códigos al hipocampo, donde se computan para trazar mapas a medida de

NEUROCARTOGRAFÍA

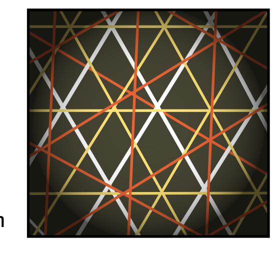
Cómo se orienta el cerebro

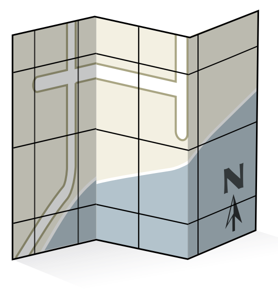
La idea de que el cerebro de los mamíferos levanta un mapa mental que plasma la geometría espacial del mundo exterior surgió alrededor de 1930. Desde entonces los neurocientíficos han descubierto las neuronas que trabajan en equipo para crear dichos mapas. Un descubrimiento clave llegó en 1971 cuando un investigador angloestadounidense constató que las células de ubicación del hipocampo de las ratas solo se activaban cuando el roedor se hallaba en lugares concretos, fuera cual fuera la ruta recorrida. En 2005, los autores del presente artículo descubrieron las neuronas de retícula, que permiten calcular la posición en el entorno, es decir, en relación con las paredes de un recinto. Cuando el roedor se desplaza, cada neurona de este tipo se activa en múltiples posiciones que coinciden con los vértices de un hexágono.



Emerge un mapa cognitivo

La actividad de las neuronas de retícula crea un mapa (*derecha*) similar a un mapa geográfico (*extremo derecha*). En concurso con las neuronas de ubicación, que identifican la situación del animal en un entorno particular, las neuronas de retícula permiten construir una imagen mental de los alrededores.





FUENTE: «SCIENTIFIC BACKGROUND: THE BRAIN'S NAVIGATIONAL PLACE AND GRID CELL SYSTEM», POR OLE KIEHN Y HANS FORSSBERG, CON ILUSTRACIONES DE MATTIAS KARIEN. NOBELPRIZE.ORG, NOBEL MEDIA AB, 2014 WWW.NOBELPRIZE.ORG/NOBEL_PRIZES/MEDICINE/LAUREATES/2014/ADVANCED.HTML (*arriba*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

LISTA DE COMPONENTES

Las entrañas del GPS cerebral

El sistema de navegación del cerebro humano reside en las profundidades del lóbulo temporal medial. Dos áreas de esta región, la corteza entorrinal y el hipocampo, actúan como componentes clave del GPS cerebral. El refinamiento del sistema de búsqueda de rutas, propio del cerebro de los mamíferos, depende en parte de distintas redes de neuronas especializadas de la corteza entorrinal.

Hipocampo (sede de las neuronas de ubicación)

Corteza entorrinal (sede de las neuronas de retícula)

CA3

Giro dentado

CA1

Hipocampo (*verde*)

Corteza entorrinal (*amarillo*)

Sección transversal de la región hipocámpica

Enviando mensajes al hipocampo

La corteza entorrinal transmite información desde las neuronas de retícula acerca de la dirección y la distancia recorrida. Lo hace a través de varios canales que la enlazan con regiones del hipocampo (giro dentado, CA3 y CA1). Así se genera un mapa mental optimizado para planificar futuros recorridos (*recuadro*).

Una mirada atenta a la organización de las neuronas de retícula...

... revela que la separación de los elementos hexagonales que ayudan a trazar el mapa espacial cambia al descender por la corteza entorrinal. En los más separados la rata ha de cubrir una distancia más larga para activar un vértice de la red. En la parte superior de la corteza entorrinal la rata que activa una neurona de retícula en un vértice del hexágono tendrá que recorrer entre 30 y 35 centímetros hasta el vértice colindante; en la parte inferior, necesita recorrer varios metros.

Pequeña escala

Gran escala

Otras neuronas especializadas descubiertas recientemente...

... en la corteza entorrinal de los roedores transmiten información desde el hipocampo sobre la orientación de la cabeza del individuo, su velocidad de marcha y la distancia que lo separa de las paredes y otros obstáculos. Los impulsos de esas neuronas se combinan para crear un mapa compuesto de los alrededores.

Orientación

Velocidad

Reconocimiento de límites

JEN CHRISTIANSEN

cada lugar. Desde el punto de vista evolutivo, la integración de la información contenida en dos juegos de mapas parece ser una solución eficaz para un sistema de orientación espacial. Las redes formadas en la corteza entorrinal medial que calculan la distancia y la dirección no cambian de un espacio a otro. En cambio, las neuronas de ubicación del hipocampo dibujan un mapa distinto de cada espacio.

MAPAS LOCALES

La dilucidación del sistema neuronal de orientación sigue su curso. Casi todo lo que sabemos acerca de las neuronas de ubicación y de retícula procede de experimentos que han registrado la actividad eléctrica de las neuronas cuando las ratas o los ratones paseaban libremente por un ambiente artificial (habitáculos de fondo liso y sin estructuras internas que sirvieran como puntos de referencia).

El laboratorio es muy distinto del entorno natural: este cambia sin cesar y está lleno de objetos tridimensionales. El reduccionismo de los estudios suscita dudas sobre si las neuronas de ubicación y de retícula se activarán de la misma forma fuera de las cuatro paredes.

Los experimentos con laberintos complejos que pretenden imitar el hábitat natural aportan algunas pistas de lo que podría estar por llegar. En 2009 analizamos la actividad de las neuronas de ubicación cuando los animales recorrían un intrincado laberinto en el que cada corredor acababa en un recodo muy cerrado

del que arrancaba el siguiente pasillo. El estudio reveló que, tal y como era de prever, las neuronas de retícula formaban redes de hexágonos para cartografiar las distancias en cada corredor. Pero cada vez que el animal giraba para pasar al siguiente pasillo se producía una transición abrupta: otra retícula distinta se superponía sobre el nuevo pasillo, casi como si la rata estuviera accediendo a un espacio completamente nuevo.

Trabajos ulteriores en nuestro laboratorio han demostrado que los mapas reticulados se dividen en mapas más pequeños en entornos abiertos cuando estos son lo bastante grandes. Ahora estamos investigando cómo se fusionan estos mapas pequeños para crear un mapa integrado de una zona. Incluso estos experimentos son simplificaciones, puesto que los recintos son planos y horizontales. Los experimentos de otros laboratorios (con murciélagos en vuelo y ratas trepando por jaulas) comienzan a proporcionar algunas claves. Al parecer, las neuronas de ubicación y de direccionamiento se activan en lugares específicos de cualquier espacio tridimensional, y seguramente las neuronas de retícula lo hagan también.

ESPACIO Y MEMORIA

El sistema de navegación del hipocampo hace algo más que ayudar a su poseedor a ir del punto A al B. Aparte de recibir información sobre la posición, la distancia y la dirección desde la corteza entorrinal medial, el hipocampo crea un recuerdo de lo que hay en ese lugar (sea un coche o un asta de bandera) y de los sucesos que tienen lugar en él. Así pues, el mapa espacial creado por las neuronas de ubicación no solo contiene información sobre el paradero del animal, sino detalles sobre su experiencia, a semejanza de la concepción que Tolman tenía sobre el mapa cognitivo.

Parte de esa información anexa parece provenir de las neuronas de la región lateral de la corteza entorrinal. Las particularidades de los objetos y los sucesos se funden con las coordenadas del animal y se guardan como un recuerdo. Cuando más tarde este se rememora, se accede tanto al suceso como a la posición.

Esta combinación de lugar y memoria recuerda un método mnemotécnico ideado por los antiguos griegos y romanos. El método de los lugares (*loci*) permite memorizar una lista imaginando que cada uno de sus componentes ocupa una posición a lo largo de un itinerario que discurre por un lugar conocido, como un paraje o un edificio, denominado a menudo «Palacio de los recuerdos». Los participantes en concursos de memoria aún recurren a esta técnica para recordar listas de números, letras o naipes.

Desgraciadamente, la corteza entorrinal es una de las primeras áreas dañadas por el alzhéimer. La enfermedad causa la muerte de las neuronas emplazadas en ella, y la reducción de su tamaño se considera una prueba fehaciente para detectar a los individuos en riesgo. La tendencia a vagar sin rumbo y perderse es también otro de los indicadores iniciales del trastorno. En los últimos estadios del alzhéimer las células del hipocampo mueren, lo que impide rememorar experiencias o recordar conceptos como el nombre de los colores. De hecho, un estudio reciente advierte de que las neuronas de retícula de los portadores jóvenes de un gen de alto riesgo del alzhéimer podrían sufrir deficiencias funcionales, un descubrimiento que podría conducir a nuevas vías de diagnóstico de la enfermedad.

UN RICO REPERTORIO

Hoy, casi noventa años después de que Tolman propusiera por primera vez la existencia de un mapa mental de nuestro entorno, es evidente que las neuronas de ubicación son un componente más de la intrincada representación en que el cerebro convierte su entorno espacial para calcular la ubicación, la distancia, la velocidad y la dirección. Los diversos tipos de neuronas descubiertos en el sistema de orientación del cerebro de los roedores también se hallan en los murciélagos, los monos y el ser humano. Su presencia en todos los órdenes de los mamíferos indica que las neuronas de retícula y otras células involucradas en la orientación surgieron hace tiempo en la escala evolutiva y que todas las especies emplean algoritmos neurales parecidos para calcular la posición.

Muchos elementos constructivos del mapa de Tolman han sido descubiertos y comenzamos a entender cómo el cerebro los crea y los despliega. El sistema de representación espacial se ha convertido en uno de los circuitos mejor conocidos de la corteza de los mamíferos y ha comenzado el desciframiento de los algoritmos, lo que ayudará a desentrañar los códigos neurales empleados por el cerebro para la orientación.

Como en tantos campos de investigación, los nuevos descubrimientos suscitan interrogantes. Sabemos que el cerebro posee un mapa interno, pero todavía sabemos poco sobre cómo se entrelazan los elementos del mapa para crear una representación coherente del posicionamiento, y cómo interpretan esa información otros sistemas cerebrales a la hora de tomar decisiones sobre adónde ir y cómo llegar.

Las incógnitas son muchas. ¿La red espacial del hipocampo y de la corteza entorrinal se limita a regir la orientación en el entorno inmediato? En los roedores examinamos áreas cuyo radio de alcance tiene escasos metros. ¿Intervienen también las neuronas de ubicación y de retícula en la orientación en grandes distancias, como cuando los murciélagos migran cientos o miles de kilómetros?

Por último, nos preguntamos cómo se originan las neuronas de retícula, si existe un período crítico para su formación durante el desarrollo del animal y si tanto ellas como las neuronas de ubicación son propias de otros vertebrados o invertebrados. De hallarse en estos últimos, significaría que la evolución ha empleado este sistema de cartografía tridimensional durante cientos de millones de años. El GPS cerebral continuará siendo un magnífico tesoro, con pistas para nuevas investigaciones que ocuparán a generaciones enteras de científicos en las décadas venideras.

PARA SABER MÁS

Grid cells and cortical representation. Edvard I. Moser et al. en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 15, n.º 7, págs. 466-481, julio de 2014.

Grid cells and the entorhinal map of space. Edvard I. Moser. Conferencia del Premio Nobel, 7 de diciembre de 2014. **www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2014/edvardmoser-lecture.html**

Grid cells, place cells and memory. May-Britt Moser. Conferencia del Premio Nobel, 7 de diciembre de 2014. **www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2014/may-brittmoser-lecture.html**

EN NUESTRO ARCHIVO

Sistema mental de orientación. Hanspeter A. Mallot en *MyC* n.º 11, marzo/abril de 2005.

Memoria cartográfica. James J. Knierim en *MyC* n.º 30, mayo/junio de 2008.

Las neuronas de pilotaje. Simon Makin en *MyC* n.º 74, septiembre/octubre de 2015.



A MÁS DE 400 AÑOS LUZ DE LA TIERRA, la estrella J1407 (*arriba a la izquierda*), de solo 16 millones de años de edad, alberga a su alrededor un mundo gigante circundado por el sistema de anillos planetarios más grande que se conoce. En una franja vacía entre los anillos del planeta, una luna recién nacida (*en primer plano*) del tamaño de Marte brilla todavía por el calor remanente de su formación.

EXOPLANETAS



Los anillos de un supersaturno

Los astrónomos han descubierto un gigantesco sistema de anillos —y tal vez una luna— en torno a un planeta situado a 400 años luz de la Tierra

Matthew Kenworthy



Matthew Kenworthy es profesor asociado de astronomía en el Observatorio de Leiden, en los Países Bajos. Estudia planetas extrasolares y diseña coronógrafos ópticos para poder fotografiarlos.

GRAN PARTE DE LA ASTRONOMÍA SE HACE EN LOS DESPACHOS Y OBSERVATORIOS DE LOS científicos. Pero las teorías más apasionantes las encontraremos donde se baja la guardia y las ideas más atrevidas campan a sus anchas. No es casualidad que, para dar con uno de los mejores bares de Tucson —el 1702, por el número que ocupa en su calle—, haya que ir no muy lejos del Observatorio Steward de la Universidad de Arizona. Fue allí donde mi colega Eric Mamajek, de la Universidad de Rochester, me mostró algo que nos llevó a embarcarnos en la búsqueda del primer planeta anillado fuera de nuestro sistema solar; una búsqueda que se realizaría tanto con los telescopios más modernos del mundo como mediante observaciones astronómicas ya centenarias. Como resultado de nuestra investigación, no solo encontramos un sistema de anillos mucho mayor que el de Saturno, sino también lo que parece ser una luna recién nacida.

EL DESCUBRIMIENTO DE LOS ANILLOS

La historia comienza en 2011, año en que Mamajek y Marcos Pécaut, que por entonces era estudiante de doctorado suyo, elaboraban en Rochester un catálogo de estrellas muy jóvenes cercanas a la Tierra. Para calcular las edades de las estrellas candidatas, Mamajek y Pécaut se basaban en sus velocidades de rotación. Las estrellas más jóvenes giran más rápido que las de mayor edad; la rotación se cronometra observando cómo aparecen y desaparecen de nuestra vista las manchas estelares (regiones más oscuras y frías en la superficie del astro).

Una de las candidatas a figurar en el catálogo no tenía nombre, solo un código formado a partir de los instrumentos que la habían observado y de su posición en el cielo (en la constelación del Centauro): 1SWASP J140747.93-394542.6. Ahora, para abreviar, la llamamos J1407. Al igual que las demás estrellas del estudio, estaba demasiado lejos como para poder ver sus manchas directamente; por eso, Mamajek y Pécaut buscaron en su curva de luz (la gráfica de su brillo a lo largo del tiempo) las pequeñas caídas de luminosidad que se producen cuando las manchas aparecen en nuestro campo de visión y reducen la luz de la estrella. También los planetas pueden causar tales caídas de brillo cuando, vistos desde la Tierra, transitan por delante de su estrella anfitriona. Mamajek y Pécaut encontraron la curva de J1407 en la base de datos del proyecto SuperWASP, una búsqueda de planetas por medio de cámaras que hasta la fecha ha encontrado más de 100 planetas en tránsito mediante la observación de unos 31 millones de estrellas.

La curva de luz indicaba que, en efecto, J1407 era una estrella joven que giraba rápidamente. Pero también reveló algo más. Una ojeada rápida a la curva de luz obtenida por SuperWASP mostró que, en 2007, esta estrella —por lo demás bastante corriente— parpadeó muchas noches siguiendo una pauta impredecible y luego se oscureció repetidas veces, llegando a ser casi invisible durante una semana, antes de recuperar finalmente su brillo habitual. Los datos de otros años no exhibían una variación semejante en el brillo de la estrella. Ese extraño suceso no llamó demasiado la atención en 2007, de modo que la curva permaneció relegada en los archivos. Pero, tras verla en 2011, Mamajek no pudo olvidarse de ella.

«Colgué una copia de la curva de luz en la pared de mi despacho y estuve mirándola durante semanas», rememoraba a mi lado en el bar de Tucson. «La estructura y esos detalles tan extraños eran únicos. ¿Qué podía haber provocado esos rápidos cambios en el brillo de la estrella?»

Poco después de aquella conversación empezamos a trabajar juntos para resolver el misterio. Descartamos rápidamente las explicaciones más simples, como algún problema en las cámaras de SuperWASP o unas malas condiciones de observación. Fuera lo que fuese lo que había provocado el misterioso oscurecimiento de J1407, no se encontraba en la Tierra.

EN SÍNTESIS

Se ha descubierto un descomunal sistema de anillos, unas 200 veces más grande que el de Saturno, alrededor de un planeta gigante que orbita en torno a una estrella distante en la Vía Láctea.

Usando tanto observaciones efectuadas con los medios más avanzados como datos de archivo, astrónomos profesionales y aficionados están intentando estudiar el sistema con mayor detalle.

Los modelos que se han elaborado para describir los anillos indican que estos podrían albergar una luna del tamaño de Marte. Si se confirma su presencia, se trataría del primer satélite hallado fuera del sistema solar, lo que apuntaría a que hay más a la espera de ser descubiertos. Los futuros estudios de este sistema único prometen seguir revelando detalles sin precedentes sobre cómo se forman los planetas y las lunas en torno a otras estrellas.

RON MILLER (*páginas anteriores*)

Pronto llegamos a la conclusión de que algo muy grande y muy rápido había eclipsado J1407 y la había hecho parpadear. La velocidad de las fluctuaciones de brillo indicaba que ese objeto se desplazaba por delante de la estrella a 30 kilómetros por segundo. Y, sin embargo, ¡el eclipse se alargó durante 56 días! Semejante duración implicaba que el objeto debía medir unos 180 millones de kilómetros.

No son tantas las explicaciones verosímiles de una estructura de semejante tamaño. Una por una, las fuimos considerando y descartando. ¿Podía tratarse de un cinturón de polvo que orbitase cerca de la estrella? No, pues alrededor de J1407 no veíamos el característico resplandor infrarrojo que se esperaría del polvo caliente. ¿Estábamos ante un sistema binario, en el que una estrella gigante roja eclipsaba a una compañera más pequeña, como una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro? Tampoco: por lo general, tales sistemas emiten muchos más rayos X de los que observábamos, y J1407 tampoco parecía una estrella gigante. ¿Podía ocurrir que el parpadeo fuese una coincidencia provocada por algo que flotase en el espacio interestelar entre la Tierra y la estrella? ¿O tal vez J1407 era un complicado sistema triple, con una compañera eclipsante de 180 millones de kilómetros? Ninguna de estas posibilidades se ajustaba a los datos. Al final, la explicación más sencilla compatible con todas las observaciones era también muy extraña: las caídas en la curva de luz podían deberse a un enorme sistema de anillos, unas 200 veces más grande que el de Saturno, que rodease a un planeta no visible que, en 2007, se hubiese interpuesto entre J1407 y la Tierra.

Pero ¿por qué pensamos en un sistema de anillos? La característica más sorprendente de la curva de luz era el nivel de detalle que podía apreciarse en todas las escalas de tiempo: aunque los eclipses duraron 56 días, había cambios rápidos que tuvieron lugar en tan solo 20 minutos. Tales velocidades apuntaban a que el enorme objeto causante de los eclipses tenía grandes cantidades de subestructura, mientras que la forma aproximadamente simétrica de la curva de luz indicaba que poseía una geometría circular o elíptica, como el familiar sistema de anillos de Saturno. Si estábamos en lo cierto, los gigantescos anillos planetarios serían los primeros descubiertos fuera del sistema solar.

A LA CAZA DEL PLANETA

Si realmente se trataba de un sistema de anillos gigante, entonces tenía que haber un planeta también gigante alrededor de J1407 que los mantuviese en su sitio. Así que empezamos a buscar el planeta, al que denominamos J1407b, utilizando el instrumental avanzado de dos de los mayores observatorios de la Tierra: el telescopio de 10 metros Keck II, en Hawái, y el VLT de 8,2 metros, en Chile.

Los planetas, incluso los más grandes y brillantes, son mucho más tenues y difíciles de observar que sus estrellas anfitrionas. Pero J1407 es una estrella muy joven: dada su corta edad estimada (tan solo 16 millones de años), cualquier planeta gigante gaseoso que orbitase alrededor de ella todavía brillaría intensamente en luz infrarroja debido al calor de su formación. Teniendo en cuenta la distancia a la que se encuentra J1407 de la Tierra, este posible planeta, visto a través de un potente telescopio, parecería estar separado de la estrella por tan solo 50 milisegundos de arco (equivalentes a la longitud de un campo de fútbol situado en la superficie de la Luna tal y como se vería desde la Tierra). Aunque suponía un gran reto, esta observación estaba al alcance de nuestras posibilidades.

Durante dos años, tratamos de tomar una imagen del planeta mientras buscábamos los característicos cambios periódicos en el movimiento de la estrella causados por el tirón gravitatorio

MISTERIO DE LUCES Y SOMBRAS

Una curva desconcertante

Las curvas de luz (la variación del brillo de un objeto a lo largo del tiempo) son herramientas básicas para el estudio de las estrellas. Un breve aumento del brillo puede ser el resultado de fulguraciones estelares, mientras que las disminuciones momentáneas quizá se deban a manchas estelares o al tránsito de un planeta en órbita. Pero los astrónomos no habían visto fluctuaciones tan extrañas como las que, en 2007, presentó la curva de luz de la estrella J1407 (*abajo*). Algún fenómeno poco habitual tuvo que hacer que el astro parpadease y se oscureciese durante varios meses seguidos.

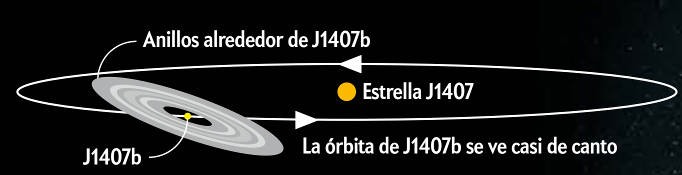
LA EXTRAÑA CURVA DE LUZ DE J1407 DURANTE UN ECLIPSE EN 2007

FUENTE: «ANALYSIS OF 1SWASP J140747.93–394542.6 ECLIPSE FINE-STRUCTURE: HINTS OF EXOMOONS», T. I. M. VAN WERKHOVEN, M. A. KENWORTHY Y E. E. MAMAJEK EN *MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY*, VOL. 441, N.º 4, 11 DE JULIO DE 2014

Cómo dibujar el mapa de un sistema de anillos

Tras considerar y descartar un amplio abanico de posibles explicaciones de la peculiar curva de luz de J1407, los astrónomos llegaron a la conclusión de que su parpadeo tenía que deberse a las sombras proyectadas por un gigantesco sistema de anillos planetarios, los cuales rodearían a un planeta en órbita que, sin embargo, no resultaba visible. Para demostrarlo, elaboraron un mapa de los anillos a partir la curva idealizada de luz que generaría un sistema semejante.

Desde el punto de vista del observador, un planeta que se mueve delante de una estrella es equivalente a una estrella que se mueve detrás de un planeta; aquí, por simplicidad estética, hemos representado la segunda posibilidad.



Trayectoria de la estrella detrás de los anillos

Trayectoria de la estrella detrás de los anillos

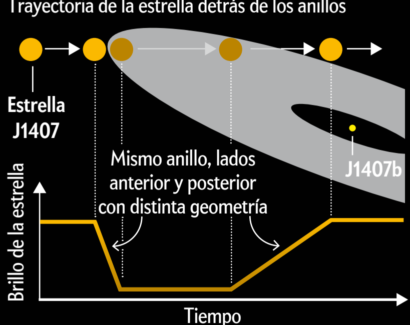
Mismo anillo, lados anterior y posterior con la misma geometría

Brillo de la estrella

Tiempo

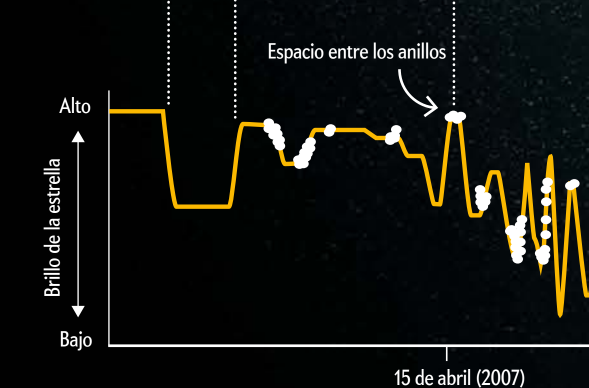
MODELO BÁSICO

Todo sistema de anillos planetarios forma un conjunto simétrico de elipses anidadas. Si el planeta transita cerca de su estrella y los anillos se encuentran perfectamente alineados con la línea de visión desde la Tierra, la impronta resultante en la curva de luz será muy simétrica. Cuando un anillo pasa por delante de la estrella, su lado anterior proyecta una primera sombra, seguida al cabo de un tiempo por la sombra generada por el lado posterior. En esta situación ideal, la simetría hace que sea fácil contar los anillos y hallar su separación.



SISTEMA INCLINADO

Fuera de ese pequeñísimo subconjunto de geometrías de visualización, la mayoría de las perspectivas presentarán el sistema de anillos inclinado con un cierto ángulo, lo que producirá vaivenes más complicados en la curva de luz. En estos casos, para deducir la inclinación, el número y la separación de los anillos, son necesarias mediciones más complicadas, que examinen propiedades como el cambio de pendiente entre los segmentos de una curva de luz.



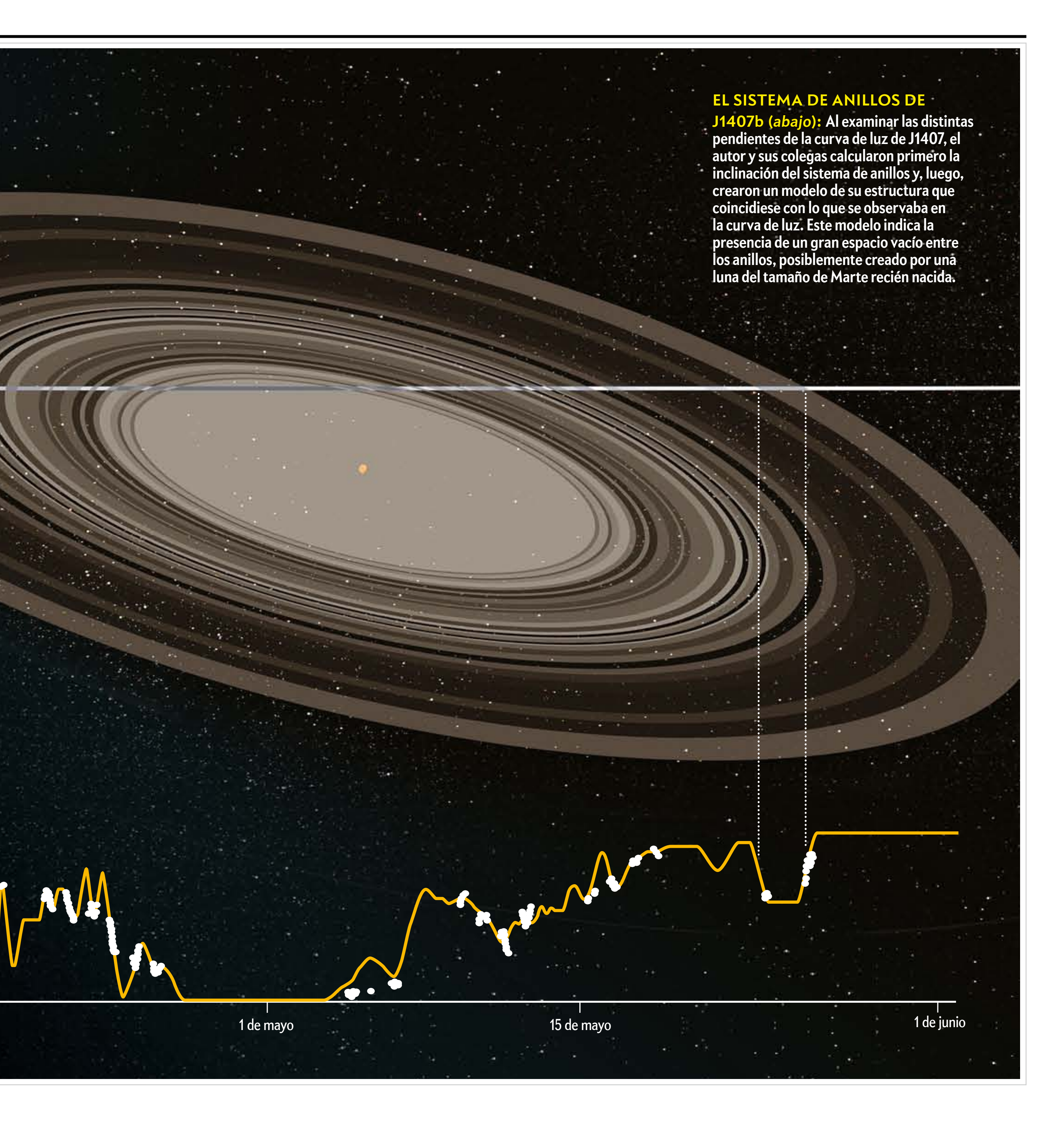
ILUSTRACIONES DE NIGEL HAWTIN *(esquemas)*, RON MILLER *(sistema de anillos de J1407b)*

a un lado y a otro de ese mundo oculto que orbitaba a su alrededor. También conseguimos el apoyo de una red de astrónomos profesionales y aficionados (incluida la Asociación Americana de Observadores de Estrellas Variables) para controlar cada noche el brillo de J1407, por si se produjese la atenuación que señalaría el inicio de otro eclipse.

No encontramos nada. Eso no significaba que el planeta no existiese: aunque su masa fuera 12 veces la de Júpiter, sería fácil que se nos escapase. También podía ser que estuviésemos mirando en el momento equivocado, cuando el planeta permanecía detrás de la estrella, invisible para nosotros. Aun así, esas detecciones fallidas nos permitieron descartar algunos tipos de estrellas compañeras de masa baja como posible causa de la atenuación de J1407.

LOS ANILLOS, AL DESCUBIERTO

A pesar de la incertidumbre, seguimos adelante. Tratamos de hacer conjeturas sobre la estructura de los anillos que, según sospechábamos, giraban alrededor de J1407b. Durante meses, nuestro equipo desarrolló modelos informáticos para extraer de

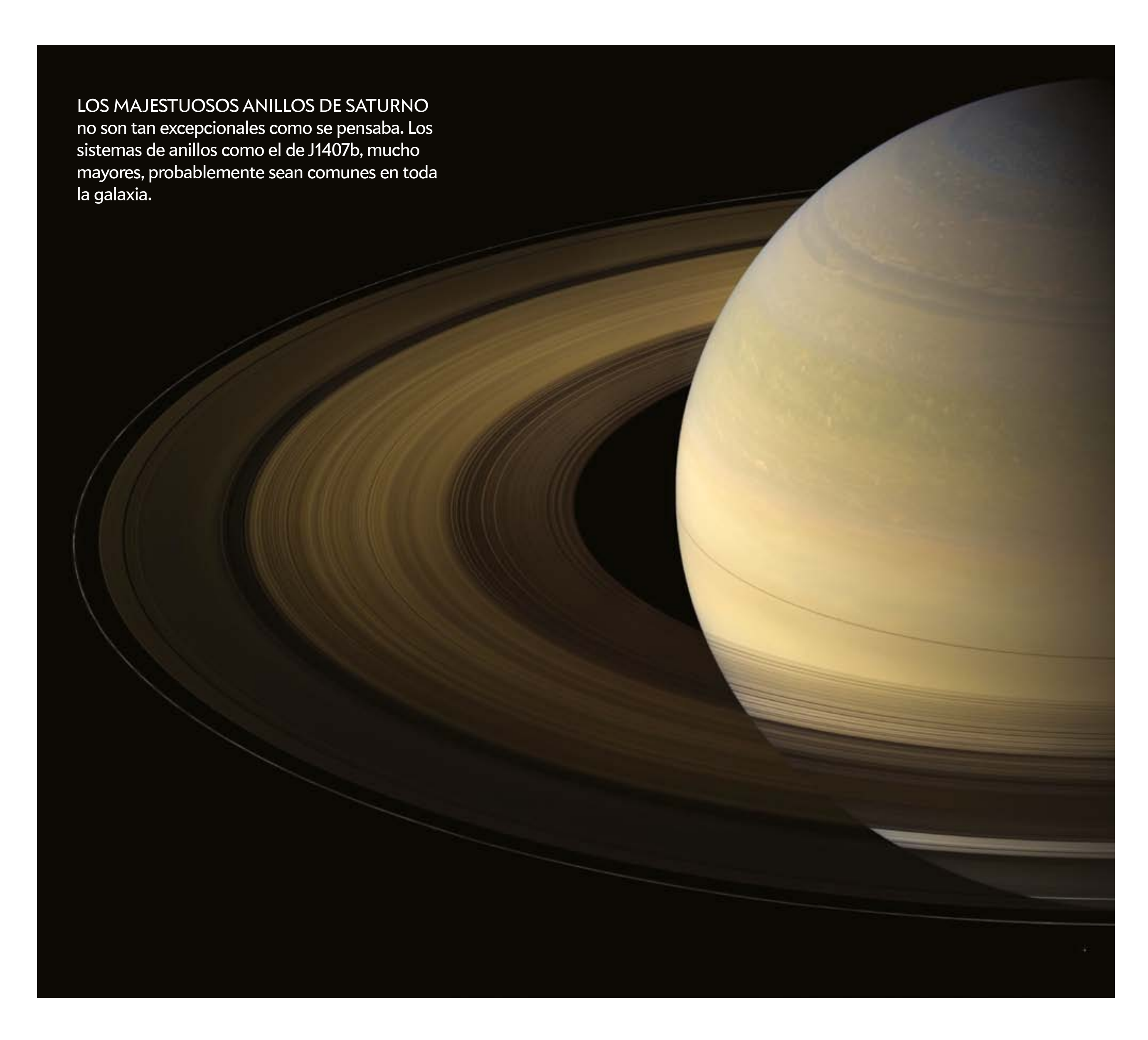


EL SISTEMA DE ANILLOS DE J1407b (*abajo*): Al examinar las distintas pendientes de la curva de luz de J1407, el autor y sus colegas calcularon primero la inclinación del sistema de anillos y, luego, crearon un modelo de su estructura que coincidiese con lo que se observaba en la curva de luz. Este modelo indica la presencia de un gran espacio vacío entre los anillos, posiblemente creado por una luna del tamaño de Marte recién nacida.

la curva de luz de J1407 información acerca de la composición y estructura tridimensional de los anillos.

Estábamos hablando del problema con varios colegas enfrente de una pizarra blanca cuando, de repente, se nos ocurrió una idea: a pesar de que no conocíamos el número exacto de anillos ni la posición de cada uno de ellos, la pendiente de los tramos inclinados de la curva de luz podía darnos pistas sobre la geometría general del sistema de anillos; por ejemplo, sobre cómo estaban alineados con respecto a la estrella. Gracias a esta información adicional, podríamos completar nuestro modelo informático y generar curvas de luz sintéticas para un conjunto de posibles inclinaciones de los anillos. Y, en efecto, ¡una de las configuraciones que probamos se ajustaba a los característicos picos y caídas que veíamos en los datos de J1407!

Armados con estos conocimientos, procedimos a establecer cómo era el sistema de anillos. Cada parte de la curva de luz la identificamos con anillos a diferentes distancias del planeta J1407b. Cada cambio en la pendiente de la curva de luz marcaba el comienzo o el final del tránsito de un anillo. Contando todos estos puntos en la curva de luz, vimos al menos 24 anillos. Aunque,



LOS MAJESTUOSOS ANILLOS DE SATURNO no son tan excepcionales como se pensaba. Los sistemas de anillos como el de J1407b, mucho mayores, probablemente sean comunes en toda la galaxia.

teniendo en cuenta las lagunas en los datos causadas por malas condiciones de observación, calculamos que es más probable que el sistema tenga como mínimo 100.

Tenemos suerte de ver el sistema de anillos de J1407b en este estadio de su evolución. Para entender por qué, consideremos nuestro viejo amigo Saturno y cómo han evolucionado sus anillos con el tiempo. El aspecto «sólido» de los anillos no es, en realidad, más que una ilusión. Están formados por partículas de hielo que describen órbitas circulares alrededor del planeta. Esas partículas, como agregado, están esculpidas por pequeñas lunas que orbitan entre ellas y justo más allá de su borde exterior. Se piensa que hubo un tiempo en que los anillos de Saturno eran más grandes, pero las pequeñas partículas situadas en los bordes exteriores del sistema se agruparon debido a su gravedad mutua, en un proceso que fue ganando importancia hasta crear algunas de las lunas de Saturno que conocemos hoy. Aquel panorama debió de ser tan bello como fugaz: un observador que hubiese vivido justo en el intervalo de tiempo cósmico en que era posible contemplarlo habría sido muy afortunado.

Al igual que el sistema de Saturno hace mucho tiempo, el de J1407b parece hallarse actualmente en transición. Nuestro modelo indica que contiene una gran franja vacía, probablemente generada por algo que los astrónomos no han visto nunca antes: una luna —una exoluna recién nacida— orbitando alrededor de J1407b. Según nuestros cálculos, dicho satélite tardaría casi dos años en completar una vuelta en torno a J1407b y podría tener la masa de Marte. Aunque, por sí sola, la franja vacía no constituye una prueba definitiva de la presencia de una exoluna, si se confirmase la existencia de J1407b y su sistema de anillos, sería el mejor indicio que tenemos hasta la fecha de la existencia de estos astros tan esquivos, buscados por los astrónomos desde hace tiempo.

La imagen de este sistema exótico y dinámico no podría ser más espectacular. Volando hacia él desde el espacio interestelar, veríamos cómo el resplandor de la estrella principal casi sofoca el brillo del planeta, más frío (aunque todavía al rojo vivo). Si nos acercásemos al planeta desde arriba, los anillos parecerían ondulaciones luminosas extendidas sobre el oscuro fondo del espacio. El plano de los anillos, circundado por abanicos de escombros producidos por colisiones, estaría plagado de ondulaciones, correspondientes a «olas» de material en fase de agregación. Algunas de esas olas romperían en la gran franja

CORTESÍA DE LA NASA, JPL E INSTITUTO DE CIENCIAS DEL ESPACIO

vacía producida por la mayor de las agregaciones entre dos anillos: la luna del tamaño de Marte.

Si la luna orbitase ligeramente fuera del plano del sistema de anillos y nos encontrásemos sobre su superficie, veríamos los anillos circundantes arqueándose sobre todo el firmamento a nuestro alrededor. Si tuviese atmósfera, algunas de las partículas errantes de los anillos la atravesarían y arderían por la fricción, por lo que el cielo se llenaría de majestuosas lluvias de estrellas fugaces. Y, en lo alto, como una pequeña joya engastada en el resplandor de la luz dispersada por sus vastos e irregulares anillos, estaría el planeta J1407b, surcado por oscuras bandas de nubes y encendido como un ascua.

Sin embargo, este sistema ofrece a los astrónomos mucho más que la posible existencia de bellos paisajes. Los gigantes gaseosos que orbitan cerca de su estrella anfitriona están entre los mundos extrasolares solar más fáciles de detectar. Pero, al carecer de superficie sólida, ofrecen malas perspectivas para la vida tal y como la conocemos. Sin embargo, una gran luna alrededor de un planeta así sería un asunto completamente distinto, ya que podría proporcionar una superficie rocosa que contuviese agua y que resultase más propicia para la vida. Si nuestro sistema solar sirve como referencia, la galaxia podría estar repleta de billones de grandes lunas alrededor de planetas gigantes. Demostrar la existencia de satélites alrededor de gigantes gaseosos extrasolares incrementaría enormemente el número de lugares con potencial para albergar vida.

Un pequeño grupo de investigadores lleva años buscando fervientemente exolunas, sobre todo a través de los efectos indirectos que tendrían en el movimiento de sus planetas. Los planetas en tránsito provocan una atenuación precisa y periódica de su estrella madre, pero la masa de una gran exoluna oculta causaría una variación en el calendario de eclipses, que de otro modo sería regular. Astrónomos como David Kipping, de la Universidad de Columbia, han realizado intensas búsquedas de exolunas; para ello tratan de encontrar esa impronta en las curvas de luz generadas por los mundos en tránsito descubiertos por Kepler, el satélite cazador de planetas de la NASA. Hasta la fecha no han encontrado nada. Pero la posible luna de J1407b parece indicar que tales búsquedas no seguirán siendo infructuosas durante mucho más tiempo.

Por ahora, sin embargo, tanto el planeta como su satélite son solo hipotéticos. Los mayores telescopios y los instrumentos más sensibles de la Tierra aún no han sido capaces de encontrar indicios que confirmen su existencia de manera irrefutable. Las pruebas se encontrarían, en cambio, en datos de archivo obtenidos en el pasado con técnicas mucho más rudimentarias; por ejemplo, en la colección conservada en el Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard.

REGRESO AL FUTURO

El centro acoge a muchos investigadores, y sus despachos y pasillos están llenos de gente que escruta los datos de los telescopios espaciales, escribe artículos, ejecuta simulaciones y asiste a charlas. Solo a unos pocos metros de este bullicioso edificio se encuentra el archivo de placas fotográficas de Harvard, ubicado en un tranquilo anexo de ladrillo donde pocos se aventuran. En una de sus alas, grandes sobres de papel almacenados en largas estanterías cubren hasta el techo las paredes de tres plantas del edificio. Podríamos pensar que estamos en una tienda de discos de segunda mano. Pero, en lugar de vinilos, esos sobres contienen más de medio millón de placas fotográficas procedentes de diversos observatorios: una cuarta parte de todas las placas fotográficas astronómicas del mundo. Documentan un siglo de observaciones del cielo nocturno.

En la actualidad, esas placas fotográficas están siendo escaneadas por el proyecto Acceso Digital a un Siglo de Cielo @ Harvard, cuyo objetivo es digitalizar y subir a Internet los datos almacenados en estas frágiles láminas de vidrio. Hemos determinado que J1407 aparece en unas 700 de estas placas, en imágenes tomadas entre 1901 y 1984. Con los datos que ofrecen, buscaremos más eclipses para averiguar cuándo ocurrirá el próximo.

En este momento, nos parece que lo más probable es que suceda en la próxima década. Mientras tanto, seguimos intentando obtener una prueba definitiva de la existencia del planeta y sus anillos. Casi cada noche, hay astrónomos que se dedican a vigilar J1407. Tratan de detectar la disminución de brillo que se producirá cuando el anillo más externo comience a atravesar la estrella. Desde el instante en que eso suceda, será posible efectuar numerosas observaciones para estudiar los anillos con mucho mayor detalle. Cuando los anillos se muevan delante de la estrella, podremos utilizar los espectrógrafos de los mayores telescopios del mundo para recoger algo de la luz estelar que pase a través de ellos o a su alrededor. Eso servirá para descubrir la composición química de los anillos y cómo cambia con la distancia a J1407b. Lo más emocionante es que J1407 es una estrella bastante brillante, visible desde el hemisferio sur y fácilmente observable: los astrónomos podrán seguir con telescopios pequeños las fluctuaciones de brillo de la estrella en tiempo real y proporcionar así una cobertura continua, durante las 24 horas, desde varias partes del mundo.

Nuestra zambullida en los anillos gigantes de J1407b será solo el comienzo de una serie más amplia de investigaciones relacionadas con la manera en que se forman los sistemas planetarios. Se cree que los planetas gigantes recién nacidos dan lugar a discos circumplanetarios que se condensan en lunas y anillos. Esperamos detectar pronto más de estos sistemas gracias a las sombras que, sin duda, arrojan en lugares distantes de la galaxia. Ahora que sabemos lo que estamos buscando, se ha dado el pistoletazo de salida para encontrar más sistemas de anillos gigantes y exolunas como los que pensamos que hay alrededor de J1407b. Mis colegas y yo estamos examinando a fondo nuevas bases de datos en busca de señales que delaten la presencia de más planetas con anillos en otros sistemas estelares. Al espléndido sistema de anillos de Saturno pronto le podrían salir duros competidores alrededor de otras estrellas. IyC

PARA SABER MÁS

Planetary construction zones in occultation: Discovery of an extrasolar ring system transiting a young sun-like star and future prospects for detecting eclipses by circumsecondary and circumplanetary disks. Eric E. Mamajek et al. en *The Astronomical Journal*, vol. 143, n.º 3, art. 72, marzo de 2012.

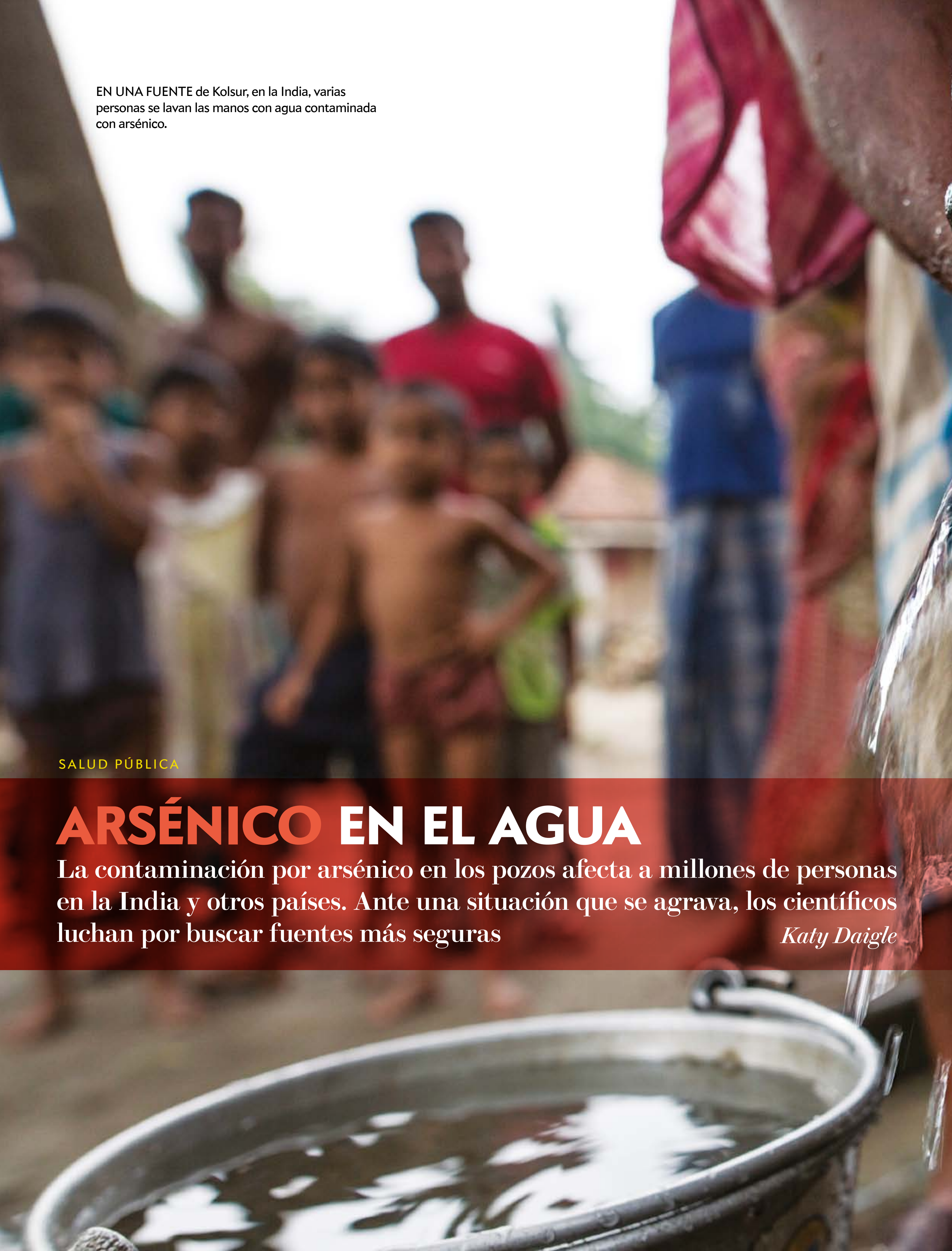
Modeling giant extrasolar ring systems in eclipse and the case of J1407b: Sculpting by exomoons? M. A. Kenworthy y E. E. Mamajek en *The Astrophysical Journal*, vol. 800, n.º 2, art. 126, febrero de 2015.

Recursos en línea relacionados con la cartografía de los anillos: **https://github.com/mkenworthy/exorings**

EN NUESTRO ARCHIVO

Más acogedores que la Tierra. René Heller en *IyC*, marzo de 2015.

A la caza de gigantes gaseosos. Lee Billings en *IyC*, octubre de 2015.



EN UNA FUENTE de Kolsur, en la India, varias personas se lavan las manos con agua contaminada con arsénico.

SALUD PÚBLICA

ARSÉNICO EN EL AGUA

La contaminación por arsénico en los pozos afecta a millones de personas en la India y otros países. Ante una situación que se agrava, los científicos luchan por buscar fuentes más seguras

Katy Daigle





Katy Daigle escribe sobre cuestiones ambientales desde Nueva Delhi.

En su noche de bodas, Gita Paul se sentía condenada. Sus padres habían pactado su casamiento con un hombre a quien nunca había visto, un habitante de Kolsur, un pueblo pobre situado a unos kilómetros de su hogar, en el mismo paisaje de arrozales, prados para el ganado y cúmulos de casas cercano a Calcuta, en el este de la India. Los matrimonios concertados entre desconocidos son comunes en la zona. Cuando Gita vio a su marido por primera vez, se quedó horrorizada: su cuerpo se hallaba cubierto de llagas y costras. Después conoció a su familia política. Un hermano mayor había perdido un pie por putrefacción, una hermana no gozaba de buena salud y otro hermano había fallecido en la treintena. En el pueblo había muchas personas enfermas. «Jamás había visto nada igual», comenta Gita años más tarde cuando se la entrevista, sentada en los toscos escalones de la diminuta casa de ladrillo de su familia. «Creí que se trataba de una enfermedad contagiosa.»

Para cuando aparecieron costras en la piel de Gita, ella ya había oído que la enfermedad no se transmitía por el aire, sino por el agua. Habían llegado científicos con unos sencillos equipos portátiles de análisis y con la mala noticia de que el agua fresca y clara de los pozos del pueblo estaba intoxicando a la gente con arsénico. Gita decidió que su marido y ella debían mudarse. Gastaron todo el dinero que tenían en trasladarse a un pueblo agrícola cercano. Pero también allí la gente se moría, y los vecinos afirmaban igualmente que los pozos estaban contaminados.

Los científicos y la gente de los pueblos tenían razón. Sin saberlo, los habitantes de muchas localidades de la región se estaban envenenado al beber agua o al cocinar y lavar los platos con ella. En Asia, al menos 140 millones de personas consumen agua contaminada con arsénico procedente de incontables pozos tubulares, bombas accionadas manualmente que se acoplan a tuberías de plástico o de metal que penetran en la tierra. Solo en la India, se han excavado durante los últimos treinta años, muchas veces a mano, más de 18 millones de estos pequeños pozos, según cifras facilitadas por el Gobierno. Se hicieron en un intento de evitar las aguas superficiales, cargadas de patógenos o de vertidos industriales. Sin embargo, la muerte también moraba bajo el suelo.

El arsénico, de origen natural, mata las células humanas, lo que primero provoca lesiones cutáneas y luego, a medida que se va acumulando lentamente en el cuerpo, daños cerebrales, cardiopatías y cáncer. Se han encontrado aguas subterráneas con arsénico en al menos 30 países, desde Argentina a China, Camboya y Vietnam, además de en zonas de Canadá y Estados Unidos (*véase el recuadro* «Distribución del arsénico subterráneo»).

El uso cada vez más extendido de pozos para acceder a las aguas subterráneas —la gente necesita agua para beber, y los agricultores, para los cultivos que alimentan a una población numerosa— no ha hecho sino empeorar las cosas. Esa captación ha alterado el curso de las corrientes subterráneas, de modo que agua que antes fue limpia corre ahora a través de sedimentos ricos en arsénico, y pozos que antes eran puros y estaban ubicados en pueblos sanos son hoy fuente de catástrofes.

Hace poco, los expertos decidieron probar una nueva estrategia: trazar mapas del subsuelo con el objetivo de determinar qué lugares ofrecen mayor seguridad a la hora de excavar pozos. Hasta el momento, sin embargo, la velocidad de las reacciones químicas y los cambios en los flujos subterráneos han sobrepasado la capacidad predictiva de los mapas. «Se trata de una situación penosa. Es sencillamente desesperada», se lamenta Dipankar Chakraborti, químico analítico que ha dedicado 28 años a estudiar el problema en la Universidad de Jadavpur, en Calcuta, donde fue director de la Escuela de Estudios Ambientales. La universidad trabaja ahora en la creación de un instituto de investigación con su nombre (la Fundación de Investigaciones DC) para promover estudios sobre el arsénico. «Estamos alterando las cosas tan deprisa bajo tierra que apenas podemos seguir el paso.»

EN SÍNTESIS

Los pozos de agua potable de las regiones más pobres y pobladas del planeta, que se excavaron para evitar las bacterias de la superficie, presentan, en cambio, altas concentraciones de arsénico.

Las modificaciones en las corrientes de los acuíferos, ocasionadas por el elevado consumo de agua por parte de una población creciente, están contaminando pozos anteriormente limpios y enfermando a la gente.

Los mapas del subsuelo, combinados con datos edafológicos y de la composición química del agua, ayudan a predecir las zonas de riesgo. Con todo, resulta difícil elaborar mapas fiables.

PAULA BRONSTEIN (*todas las fotografías*)



VÍCTIMA: Srivas Paul, envenenado por el arsénico del agua de un pozo contaminado, descansa en Kolsur. Las lesiones de su cuerpo son síntomas del envenenamiento.

EL PROBLEMA DE LOS POZOS

Las regiones afectadas más ricas, como el sudoeste de EE.UU., disponen del dinero y los medios para filtrar el agua. Sin embargo, muchas de las poblaciones más castigadas son también las más pobres del mundo. En el sur de Asia —considerada una de las zonas de mayor riesgo— hay aguas subterráneas contaminadas con arsénico a lo largo de una franja densamente poblada que abarca partes de la India, Nepal y Bangladesh. Aunque la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que el arsénico entraña peligro en concentraciones superiores a los 10 microgramos por litro, en la India el máximo legal se mantiene en 50 microgramos por litro. Aun así, el análisis de numerosos pozos arroja resultados que exceden en mucho ese límite tan permisivo.

En la India, los problemas se remontan a la década de los sesenta, cuando el país empezó a explotar acuíferos como recurso alternativo con el fin de reducir las enfermedades causadas por las aguas superficiales, infestadas de bacterias y a menudo estancadas y desprotegidas ante las aguas residuales o las escorrentías agrícolas. En 1969 se puso en marcha un programa por valor de 125 millones de dólares, subvencionado por organismos internacionales como UNICEF, para excavar más de un millón de pozos simples. A este siguieron más programas del estilo, pues parecía haber pocas opciones. La India carecía prácticamente de infraestructuras para almacenar, distribuir o filtrar el agua, situación que persiste hoy en día excepto en las ciudades más grandes.

Los pozos tubulares fueron acogidos como una solución barata que salvaba vidas. De los 1250 millones de habitantes de la India, cerca del 80 por ciento de la población rural y el 50 por ciento de la urbana se abastece de acuíferos para beber, cocinar y regar huertos y campos de cultivo. Al mismo tiempo, las aguas subterráneas resolvieron otro serio problema: la hambruna, que en la década de los ochenta había amenazado a varias regiones del país. En la actualidad, un asombroso 91 por ciento del agua destinada al riego en la India se emplea para producir arroz, trigo y caña de azúcar.

Pero la bonanza agrícola trajo sus consecuencias. La mayoría de los pozos tubulares tienen una profundidad de entre 50 y 200 metros, ya que la perforación se detenía cuando se alcanzaba la primera capa de agua sin bacterias. Por desgracia, la mayor parte del arsénico de la región se encuentra precisamente a esa profundidad, algo que se ignoraba en aquel momento. El agua situada un poco más abajo sí suele ser potable. Sin embargo, se necesita tiempo y dinero para excavar pozos más profundos, y los materiales resistentes que hay que emplear no están al alcance de muchos aldeanos pobres.

También ha habido otros obstáculos. El amplio desconocimiento y la apatía institucional entorpecen los intentos de educar a la gente sobre los riesgos. Otras soluciones aparentemente



sencillas, como recolectar el agua de lluvia o aplicarle al agua tratamientos in situ, pueden resultar demasiado complejas para las personas analfabetas. La purificación del agua con cubos llenos de arena se ve a menudo como una tarea ardua y que lleva mucho tiempo. Las pastillas de tratamiento repartidas por científicos y activistas son usadas de manera incorrecta por la gente de los pueblos, que no puede leer las instrucciones o comprender la química. Otras soluciones más permanentes, como las plantas de filtración a gran escala, que no dependen de lo que entiendan o no millones de personas, han terminado siendo caras y técnicamente engorrosas, al sufrir muchos de los inconvenientes derivados de una mala supervisión.

«El mejor remedio, por supuesto, pasa por evitar totalmente el agua contaminada», afirma Michael Berg, que dirige la investigación sobre contaminación hídrica en el Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Acuáticas, conocido como Eawag. «Pero, en comparación con las aguas superficiales contaminadas con microorganismos patógenos, el agua del subsuelo es vista como un mal menor.»

GEOLOGÍA DE UN ASESINO

El arsénico es un elemento relativamente común. Inodoro, incoloro e insípido, fue durante mucho tiempo una de las herramientas favoritas de los asesinos. Resulta tóxico para la mayoría de las formas de vida, incluso en dosis muy bajas.

Las llanuras al sur del Himalaya se incluyen entre las regiones más ricas en arsénico del planeta. Después de que el choque de placas tectónicas levantara esta colosal cordillera, los minerales de pirita abundantes en arsénico que quedaron expuestos en las laderas fueron erosionados por ríos de corriente



PELIGRO EN EL AGUA: En este estanque cerca de Berachampa, en la India, los lugareños se bañan y lavan la ropa a pesar de que se ha detectado arsénico en las aguas subterráneas de la zona.

rápida, cuyas aguas transportaron los sedimentos a través de la India, Bangladesh, China, Pakistán y Nepal. Mientras se agitaba en el agua, el arsénico disuelto participaba en reacciones químicas en las que se combinaba con oxígeno y hierro u otros metales pesados. Se formaban así gránulos que caían al lecho del río y capas estriadas de suelos impregnados de arsénico a profundidades aleatorias. A lo largo de los milenios, los depósitos de lodo fueron creando los antiguos deltas de la llanura de los ríos Ganges, Meghna y Brahmaputra, hoy una zona de casi 700.000 kilómetros cuadrados densamente poblada por unos 500 millones de personas.

Siguiendo el orden natural de las cosas, la mayor parte del arsénico debería haber permanecido bajo tierra. Sin embargo, los pozos tubulares llegaron hasta él, incluso en lugares por donde ya no fluyen ríos. «No puedes limitarte a mirar el recorrido actual de los ríos», señala Chakraborti, dibujando cursos de agua con los dedos mientras bebe café de un vaso de precipitados en su despacho de la universidad, donde archivadores y visitantes encuentran cobijo bajo una bóveda verde de plantas en macetas. «Hay que tener en cuenta cómo han variado los cursos de los ríos. En cierto momento todo esto estaba inundado de agua, así que hay muchas más posibilidades de hallar arsénico.»

No todo el arsénico de la tierra se lixivia con el agua; deben darse ciertas condiciones geológicas. Los científicos que estudian el problema han esbozado dos situaciones que inducen la liberación del arsénico; conocerlas ha abierto la puerta a elaborar modelos predictivos del riesgo que cabe esperar.

La primera de ellas es la liberación alcalina del arsénico. Este proceso tiene lugar en suelos ricos en oxígeno por los que circula agua con *p*H alto (alcalino), como sucede en algunas regiones áridas de Argentina o en el sudoeste de Estados Unidos. El agua desencadena una reacción que disgrega los óxidos de hierro y otros metales que recubren las partículas del suelo. Se libera entonces todo el arsénico que estuviera unido a esas moléculas cargadas eléctricamente, lo que permite que se disuelva y contamine las aguas subterráneas circundantes.

La segunda situación, la liberación reductora del arsénico, se produce en suelos pobres en oxígeno pero ricos en carbonos orgánicos. Tales condiciones se dan típicamente en deltas, planicies aluviales y cuencas fluviales, donde la capa superficial es a menudo lo bastante reciente como para estar aún infestada de bacterias. Estas circunstancias coinciden en buena medida con las que se dan en algunas de las regiones más pobladas del planeta; entre ellas, el norte de la India, Bangladesh y algunos países del sudeste asiático, como Vietnam. En ese caso, las enzimas bacterianas catalizan las reacciones químicas que rompen los óxidos de hierro a los que estaba unido el arsénico. Por tanto, si uno tomara una porción de suelo de una zona con acuíferos limpios y la enterrara en Bangladesh, se liberaría arsénico.

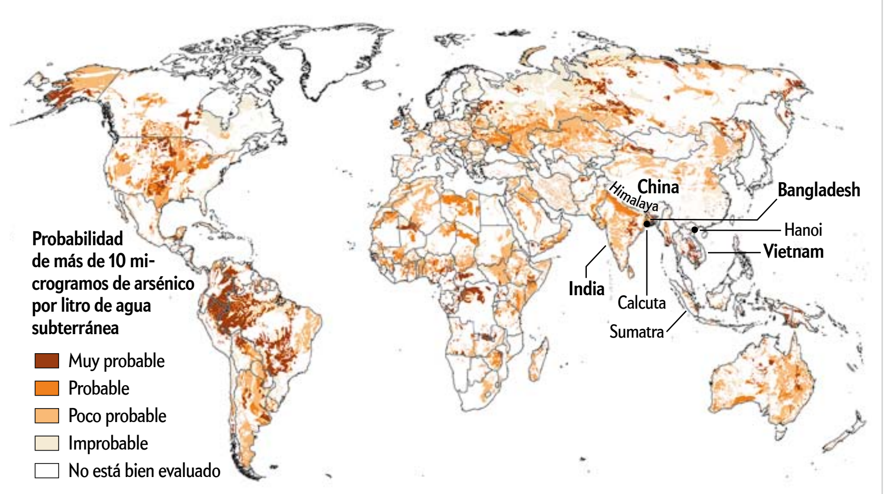
El proceso continúa mientras exista suficiente carbono orgánico para alimentar las bacterias, y va escaseando conforme aumenta la profundidad. Los abonos, que en la India se emplean en gran cantidad, pueden alargar el proceso. Por el contrario, la salinidad podría mitigarlo; en particular, los sulfuros se unirían al arsénico y se crearían precipitados. Sin embargo, esto solo sucederá mientras la concentración de oxígeno sea baja. En el momento en que se introduzca oxígeno en el sistema, las bacterias lo usarán para disolver los sulfuros y volverá a liberarse arsénico. Así pues, si los acuíferos se agotan y se recargan con rapidez, de modo que vuelva al suelo agua recién oxigenada, puede desatarse una nueva oleada contaminante. La recarga de acuíferos también es común en la India, circunstancia que brinda unas condiciones perfectas para que la liberación de arsénico se prolongue durante largos períodos.

CARTOGRAFÍA DEL PELIGRO

Por el momento, los pozos más contaminados se localizan mediante un proceso que requiere mucho tiempo y mano de obra: ir de pueblo en pueblo y examinar cada pozo con un equipo portátil de análisis químico. Tras mezclar el agua con varios agentes químicos, se inserta una tira reactiva en un recipiente sellado para que absorba el arsénico liberado. Al cabo de 10 minutos, el

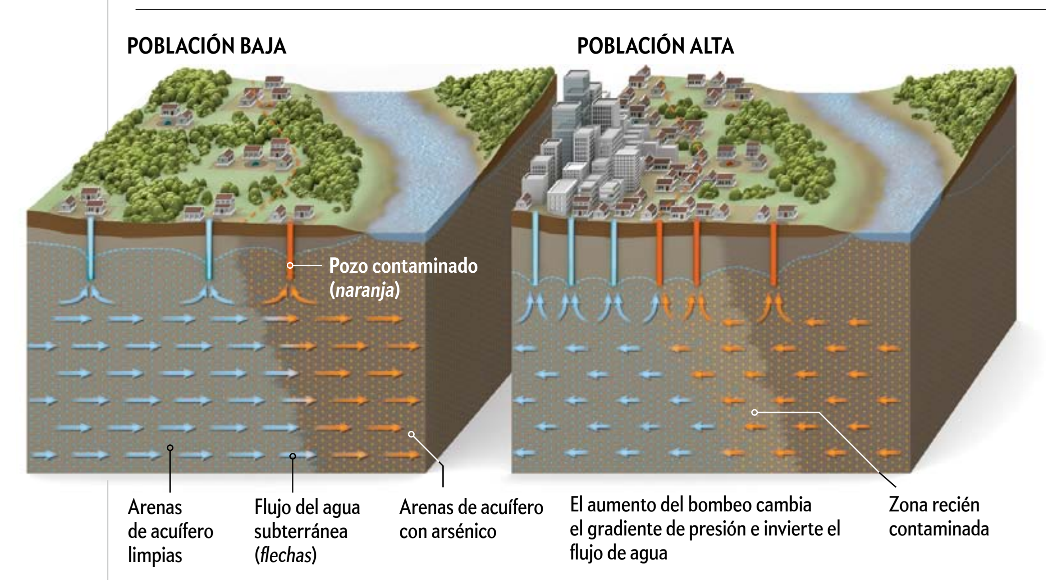
Distribución del arsénico subterráneo

El arsénico, un elemento que está presente de forma natural en minerales de suelos y rocas de todo el mundo, se encuentra por lo general unido a partículas metálicas. En contacto con aguas subterráneas, puede liberarse hasta alcanzar concentraciones peligrosas para la salud humana (10 microgramos por litro, según la OMS). Las reacciones químicas responsables de dicho proceso pueden desencadenarse de dos formas. Las aguas con *p*H alto (básico), así como aquellas con bajo contenido en oxígeno que circulan por suelos ricos en carbono orgánico, son capaces de liberar el elemento. A partir de análisis de las condiciones del terreno y del agua en varias partes del mundo, los expertos intentan predecir qué lugares presentan una mayor probabilidad de correr peligro.



Suelos envenenados: un problema mundial

Investigadores del Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Acuáticas (Eawag) han elaborado un mapa mundial del riesgo de contaminación por arsénico basándose en las características del suelo que desencadenan su liberación. La combinación de un suelo rico en oxígeno y un agua con un *p*H alto convierte ciertas zonas de Argentina y Chile en probables puntos calientes. Los suelos con abundancia de carbono orgánico y niveles bajos de oxígeno, comunes en las regiones de los deltas fluviales, como Bangladesh y el norte de la India, elevan el peligro. Se cree que esto último sucede también en la cuenca del Amazonas, aunque los datos disponibles no son del todo fiables.



Desarrollo urbano y riesgo de contaminación

Cuando una población creciente extrae del subsuelo grandes cantidades de agua destinada al riego y al consumo humano, puede modificar el flujo de aguas subterráneas y elevar con ello el riesgo de contaminación por arsénico. Hanoi, por ejemplo, se abastece de un acuífero limpio que antes fluía hacia fuera de la ciudad. Su empuje alejaba el agua de otro acuífero cercano conectado y que ya se encontraba contaminado con arsénico. Sin embargo, a causa del crecimiento reciente de la población, la ciudad empezó a excavar pozos adicionales en el acuífero limpio. La presión del agua cayó por debajo de la existente en el sucio, por lo que el flujo comenzó a invertirse y el agua envenenada se acercó a la ciudad.

FUENTES: «STATISTICAL MODELING OF GLOBAL GEOGENIC ARSENIC CONTAMINATION IN GROUNDWATER», MANOUCHEHR AMINI ET AL., EN *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, VOL. 42, N.º 10, 15 DE MAYO DE 2008 (*mapa proporcionado por Michael Berg*); «RETARDATION OF ARSENIC TRANSPORT THROUGH A PLEISTOCENE AQUIFER», DE ALEXANDER VAN GEEN ET AL., EN *NATURE*, VOL. 501; 12 DE SEPTIEMBRE DE 2013 (*estudio de Hanoi*); EMILY COOPER (*ilustración*)

color de la tira proporciona un resultado aproximado: el blanco indica que el agua está limpia; el rojo, que está envenenada. Pero esos equipos de campo solo permiten realizar pruebas burdas, que detectan la contaminación únicamente hasta cierto grado. Más allá de eso, o para obtener más detalles, es necesario analizar el agua en un laboratorio.

Puesto que la crisis se halla tan extendida, los inspectores rara vez descubren el problema a tiempo; llegan a los pozos cuando la gente ya lleva años bebiendo agua contaminada. Por tanto, algunos científicos han empezado a buscar atajos: estudian la topografía del terreno en imágenes tomadas por satélites y trazan mapas de los flujos de agua para predecir el tipo de sedimentos subterráneos y mostrar dónde existe mayor probabilidad de encontrar arsénico. Aseguran que tales métodos servirán para que los Gobiernos ahorren tiempo y dinero, al reducir el número de pozos tubulares que habría que analizar. O bien podrían izar banderas rojas en áreas que antes se creían seguras.

En 2006, Berg y otros científicos del Eawag empezaron a elaborar un mapa de la distribución del arsénico en todo el mundo basándose en modelos predictivos previos, que dependían de parámetros como la composición del suelo, la pendiente del terreno y el flujo de agua. En 2008 publicaron el primer borrador de su mapa global de probabilidades de riesgo; dentro

de poco, planean dar a conocer una nueva versión que incorpore los últimos estudios y nuevos detalles.

Dichos modelos podrán hacer predicciones en lugares donde no se efectúan análisis, afirma Berg, que ha dirigido el proyecto. Por ejemplo, su equipo pronosticó que extensas zonas de Sumatra, en Indonesia, corrían peligro. «Entonces viajamos hasta allí y llevamos a cabo pruebas que confirmaron nuestras estimaciones. Eso nos dio confianza de que este modelo predictivo no era tan malo.»

En 2013, la Universidad Médica de China se asoció con el Eawag para desarrollar un modelo para China. Previamente, las inspecciones efectuadas entre 2001 y 2005 en 445.000 pozos habían revelado que alrededor del 5 por ciento de ellos presentaba concentraciones superiores al límite legal de la India, de 50 microgramos por litro, y un número de pozos aún mayor excedía el nivel de seguridad, más conservador, recomendado por la OMS. Con extensas áreas del país todavía sin revisar, el equipo quería ayudar a los responsables políticos a emprender acciones. «Existe una barrera entre ciencia y sociedad. Tenemos que enseñar de algún modo a quienes han de formular las medidas pertinentes que podemos contribuir a resolver problemas reales», sostiene Luis Rodríguez Lado, químico de la Universidad de Santiago de Compostela y autor principal del artículo, publicado en agosto de 2013 en *Science*. El acuerdo entre el modelo sobre China y las medidas reales tomadas en pozos era del 77 por ciento. Para Rodríguez Lado, estos datos pueden ayudar a salvar vidas y a ahorrar tiempo y dinero, ya que permiten identificar los pozos que tienen que analizarse. «Eso resulta enormemente satisfactorio para cualquier científico.»



CAZADOR DE ARSÉNICO: «Apenas podemos seguir el paso», se lamenta Dipankar Chakraborti, químico de la Universidad de Jadavpur que estudia los movimientos de este elemento químico en los acuíferos.

No obstante, hay límites. Puesto que los modelos se basan en las condiciones superficiales y en el conocimiento reciente de los flujos de agua, son pobres indicadores de la composición de masas de agua subterránea más antiguas y desconocidas. «Nuestras predicciones están siempre relacionadas con lo que se ve en la superficie», admite Berg. «No podemos captar la relación con depósitos más antiguos.»

Construir modelos usando información exacta y actualizada resulta crucial para evitar errores, dice Rodríguez Lado. El experto había iniciado el estudio sobre China suponiendo que el modelo se basaría en las condiciones alcalinas, con suelo rico en oxígeno y agua básica, habida cuenta de la aridez del terreno del país y de los patrones de precipitación. «La mayor parte de China se clasificaba como medio oxidante para la liberación de arsénico», explica. «Pero la información disponible no era buena.» Pronto se dio cuenta de que los acuíferos de China eran anóxicos, como en la India y Bangladesh. Cuando repitió los cálculos usando estos parámetros, la exactitud del modelo mejoró.

Los mapas predictivos tienen otras limitaciones, sobre todo en lo que atañe a la resolución. En el modelo del riesgo en China, las cuadrículas representan áreas de 25 por 25 kilómetros, demasiado grandes para predecir qué pueblos se verán afectados. «Los modelos pueden ser útiles, pero aún hay que esperar», señala Alexander van Geen, geoquímico del Observatorio de la Tierra Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia. «Supongamos que un modelo estima que existe una probabilidad del 20 por ciento de que haya arsénico en cierta zona. Aun así, yo seguiría queriendo analizar mi pozo, ¿verdad?»

INTENTOS FALLIDOS

Los Gobiernos han probado otros métodos para afrontar el problema del suministro de agua, pero no han conseguido hacerle mella. Hace unos años, el Gobierno del estado de Bengala Occidental construyó una conducción para transportar las aguas municipales de Calcuta, libres de arsénico, hasta las poblaciones rurales del este. Sin embargo, el agua circulaba unas pocas horas al día, si llegaba a hacerlo, y no llegaba a todos los pueblos. Las tuberías, de plástico negro, sufren un mantenimiento deficiente; muchas están rotas y el agua se derrama a través de ellas, formando charcos cenagosos a la vera de la carretera.

En Bengala Occidental y en la vecina Bangladesh se instalaron cientos de plantas de eliminación de arsénico, cada una con un coste medio de unos 1500 dólares. Chakraborti y otros han demostrado que los simples mecanismos cilíndricos de filtración han sido sumamente ineficaces. En un estudio realizado en 13 de esas plantas, de distintos fabricantes, se determinó que solo dos mantenían concentraciones de arsénico por debajo del estándar indio, y ninguna conseguía alcanzar de manera fiable el valor recomendado por la OMS. Para cuando se publicó el trabajo en 2005, eso apenas importaba ya: un mantenimiento deficiente y una mala supervisión hicieron que solo tres plantas de un total de 18 siguieran en funcionamiento.

Excavar pozos más profundos que rebasen las capas actualmente contaminadas no solo es una obra costosa que mina los recursos de los pueblos, sino que, como demuestra la investigación de Chakraborti, se trata de un apaño a corto plazo. Los acuíferos inferiores, a 200 metros bajo la superficie, están separados por una gruesa capa de arcilla de las aguas envenenadas situadas

ABASTECIMIENTO PROBLEMÁTICO: En un pozo del pueblo de Kalyani, en la India, unos niños extraen agua contaminada con arsénico que será usada para beber y cocinar (*arriba*). Las plantas de tratamiento simples que eliminan el elemento químico, como esta de Kolsur (*derecha*), han recibido un mantenimiento deficiente por parte del Gobierno; la mostrada aquí no funciona.



más arriba, pero esa separación es solo parcial. Hay grietas y agujeros; por tanto, extraer agua más profunda tal vez sirva para ganar tiempo, pero tarde o temprano las aguas envenenadas se filtrarán y contaminarán lo que se encuentra debajo.

Eso ya está ocurriendo en la India, donde el consumo de agua subterránea es tan elevado que el 60 por ciento de los acuíferos del país rozarán niveles críticos en un plazo de 20 años a menos que el bombeo se restrinja drásticamente, avisa el Banco Mundial. En el pueblo bengalí de Jaynagar, Chakraborti apreció que las concentraciones de arsénico de ocho pozos tubulares que antes eran seguros habían dado un brusco salto hasta niveles peligrosos en tan solo cinco años, de 1995 a 2000.

Además de ascender y descender, el arsénico puede también moverse horizontalmente, de un acuífero sucio a otro adyacente limpio, si cambia la presión entre ambos. Eso está poniendo actualmente en peligro a Hanoi, que se abastece de un acuífero sin arsénico que antes fluía hacia fuera de la ciudad. Su empuje alejaba el agua de un acuífero vecino que estaba contaminado. Sin embargo, debido al crecimiento de la metrópolis vietnamita, se ha extraído cada vez más agua de la capa segura, lo que ha invertido el sentido del flujo. El agua del acuífero contaminado, cercano al río Rojo, ha empezado a verterse en el de la ciudad, que antes estaba limpio (*véase el recuadro* «Distribución del arsénico subterráneo»). Van Geen reconoce que el fenómeno es causa de preocupación, aunque señala que hasta ahora el problema se está desarrollando a un ritmo lento. Su estudio determinó que el arsénico se mueve de 16 a 20 veces más despacio que la propia agua, presumiblemente porque aún se encuentra unido a otros elementos del suelo, y porque las reacciones químicas subterráneas solo lo liberan poco a poco.

En la India, las cosas avanzan mucho más rápido; se aceleran con el crecimiento de la población y con lo que se está haciendo para alimentarla. Casi nadie respeta una ley de 1986 que prohíbe la sobreexplotación de las aguas subterráneas. Incluso en los campos ubicados cerca de lagos o ríos, los agricultores riegan



PROBLEMA CRECIENTE: En este arrozal a la afueras de Kolsur, al igual que en otros lugares, se necesita ahora más riego a pesar de la mala calidad del agua.

con agua del subsuelo. Aun cuando no necesitan el agua, los propietarios de tierras extraen toda la que pueden para venderla en el mercado negro. Como consecuencia, el arsénico está entrando en la cadena alimentaria: se encuentra en el arroz, en la leche de vaca y en la carne de búfalo. Chakraborti lo ha hallado incluso en refrescos embotellados y en viales de agua esterilizada de los hospitales.

LA LUCHA POR LA SEGURIDAD

A pesar de que los investigadores coinciden en el problema y en la causa, Van Geen admite que lo que no está claro es qué hacer al respecto. Al igual que Chakraborti y otros investigadores, cree que los modelos predictivos, aunque quizá tengan utilidad, no podrán suplir la necesidad de analizar sobre el terreno los pozos tubulares.

Van Geen aboga por emplear equipos baratos de análisis en las ubicaciones de los pozos. No son tan precisos como los ensayos de laboratorio, pero proporcionan resultados inmediatos con un coste mínimo. También ha descubierto un mercado laboral en potencia. Un estudio de 26 pueblos del estado de Bihar concluyó que dos tercios de los residentes estaban dispuestos a pagar 20 rupias (unos 30 céntimos de euro) para que alguien examinara sus pozos.

«No podemos ocuparnos de todos los pozos privados, así que nuestro enfoque consiste en promover una red de analistas y ofrecerles un incentivo económico para que realicen las pruebas», explica Van Geen. En Bangladesh, él y sus colaboradores consiguieron que se analizaran y localizaran con datos de GPS pozos suficientes para elaborar un mapa dinámico de cuáles eran seguros y cuáles no, de modo que a los habitantes de los pueblos les resultase más fácil encontrar agua limpia.

Los estudios de seguimiento han revelado que es más probable que las personas que pagan por los análisis hagan más caso a los resultados y cambien a pozos menos peligrosos aunque estén peor ubicados, explica Chander Kumar Singh, colaborador de Van Geen e hidrogeólogo de la Universidad TERI de Nueva Delhi. Ambos están estudiando la manera en que ciertos factores socioeconómicos, como los ingresos o la identidad de casta, podrían frenar a la gente a la hora de usar pozos seguros compartidos con otras castas o con personas menos adineradas. «No hemos observado demasiada preocupación en el Gobierno», dice Singh. «Quizá nuestro trabajo ayude a señalar el camino.»

De forma similar, Chakraborti ha formado a ayudantes para que viajen en bicicleta o en tren a los pueblos y recojan muestras de los pozos. Ha organizado congresos internacionales y ha enviado equipos de médicos, estudiantes y activistas a hacer chequeos médicos. Además, ha creado un fondo para financiar su investigación y costear análisis gratuitos de agua para los habitantes pobres. Y cuando las credenciales de Chakraborti no logran impresionar a los aldeanos, deja de lado su desagrado por las antiguas jerarquías de la India y juega la carta de su linaje brahmánico, de casta superior: se viste con el taparrabos blanco y el cordón sagrado que lucen los hombres santos brahmanes, e indica a las familias los pozos que en la actualidad son seguros. «Lo detesto, pero lo haré», dice en referencia al ardid. «Solo tengo que lograr hacérselo entender a la madre y entonces sabré que a la familia no le pasará nada malo.»

En el pueblo de Gita, su marido, Srivas, con un delicado estado de salud, lucha contra las cefaleas, el constante dolor y el agotamiento. Tiene el cuerpo cubierto de heridas encallecidas y le pica la piel, especialmente cuando está al sol. No se conocen curas para la intoxicación por arsénico ni fármacos para revertir el daño cromosómico producido. La terapia de quelación, que inyecta en la sangre agentes que se enlazan con los metales, se ha usado históricamente en casos extremos de envenenamiento con metales. Pero en la India es muy arriesgada y su coste resulta prohibitivo. Lo mejor que la mayoría puede conseguir es comer alimentos nutritivos y dejar de ingerir el veneno. Aun así, Srivas se cuenta a sí mismo entre los afortunados. Tiene un hijo adolescente que ayuda a traer cubos de agua salubre de un hospital cercano, y Gita aporta los ingresos de la familia gracias a su trabajo como sirvienta.

«No tengo quejas de nadie», declara un tembloroso Srivas, con un fatalismo tan común entre los pobres de la India que algunos científicos temen que esté apartando a los lugareños de la búsqueda de pozos limpios. «Aunque quisiera quejarme, no hay nadie que escuche.» IyC

PARA SABER MÁS

Arsenic crisis in Bangladesh. A. Mushtaque y R. Chowdhury en *Scientific American*, agosto de 2004.

Piloting a novel delivery mechanism of a critical public health service in India: Arsenic testing of tubewell water in the field for a fee. Alexander van Geen y Chander Kumar Singh. International Growth Center, febrero de 2013.

Groundwater arsenic contamination throughout China. Luis Rodríguez Lado et al. en *Science*, vol. 341, págs. 866-868, 23 de agosto de 2013.

Retardation of arsenic transport through a Pleistocene aquifer. Alexander van Geen et al. en *Nature*, vol. 501, págs. 204-207, 12 de septiembre de 2013.

Status of groundwater arsenic contamination in all 17 blocks of Nadia district in the state of West Bengal, India: A 23-year study report. Mohammad Mahmudur Rahman et al. en *Journal of Hydrology*, vol. 518, parte C, págs. 363-372, 10 de octubre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Depuración natural de aguas residuales. Cristina Ávila, Víctor Matamoros y Joan García en *IyC*, febrero de 2016.

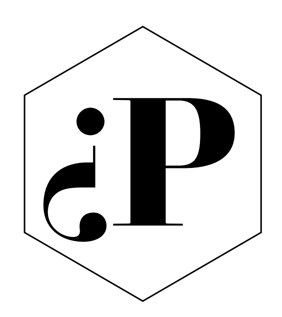
Clara Moskowitz es redactora de *Scientific American*.

MATEMÁTICAS

Ecuaciones *elegantes*

Los expertos ven en los números y los símbolos matemáticos mucho más que fría lógica: ven lo sublime

Clara Moskowitz



¿Puede considerarse bella una ecuación? Para los científicos, la capacidad de una fórmula para capturar verdades fundamentales o expresar con concisión la complejidad del mundo resulta, de hecho, exquisita. Sin embargo, muchas personas ven en las ecuaciones todo lo contrario a la belleza: algo intimidatorio, funcional y opaco. Hay también quienes encuentran seductor ese misterio y, a pesar de no entender el significado de una fórmula, se emocionan al saber que encierra conceptos más allá de su comprensión. Y tanto expertos como legos pueden sentirse cautivados por la hermosura estética de una expresión matemática, en la que unos símbolos elegantes y a veces inescrutables se combinan de forma visualmente atractiva.

Para explorar la belleza inherente y artística de las matemáticas, Daniel Rockmore, matemático de la Universidad Dartmouth, se unió en 2014 a Bob Feldman, de Parasol Press, una editorial especializada en arte. Pidieron a diez físicos y matemáticos célebres que escribieran la que para ellos fuese «la expresión matemática más bella» y, después, encargaron a la imprenta Harlan & Weaver que convirtiera sus respuestas en grabados a la aguatinta de 56 por 76 centímetros. «Puse cuidado en no darles instrucciones más allá de esa frase», explica Rockmore. «Como muestran las diez láminas, [la frase] significa algo diferente para cada persona.»

Varios expertos se decantaron por ecuaciones clásicas, como la correspondiente al método de Newton, elegida por Stephen Smale. Otros escogieron expresiones más cercanas a su persona, que incluso habían derivado ellos mismos y que se encontraban profundamente ligadas a su carrera investigadora; tal fue el caso de la ecuación de MacDonald, seleccionada por Freeman Dyson. «Me encanta la fórmula de Dyson», explica Rockmore. «Es delgada y elegante; visualmente muy nítida. Y con esos pequeños signos de exclamación para los factoriales... es hermosa.»

El proyecto ha sido bautizado *Concinnitas*, en honor a la palabra empleada por el erudito renacentista Leon Battista Alberti para describir el equilibrio que deberían mantener los distintos elementos de una obra de arte. La colección se presentó en diciembre de 2014 en la galería Annemarie Verna, de Zúrich, y desde entonces ha sido expuesta en cinco salas más. Durante los próximos meses, los organizadores tienen planeado llevarla a otros lugares. A continuación reproducimos cinco láminas.

EN SÍNTESIS

Varios matemáticos y físicos de renombre han participado en un proyecto en el que se les pidió que escribieran la expresión matemática que considerasen «más bella». Los resultados se convirtieron después en grabados a la aguatinta.

La colección ha sido llamada *Concinnitas*, un término introducido en el Renacimiento para expresar el equilibrio necesario entre los elementos de una obra de arte. Las láminas indagan la belleza intrínseca y visual de las matemáticas.

Algunos expertos se decantaron por ecuaciones que ellos mismos habían descubierto; otros prefirieron expresiones clásicas. Las razones que guiaron a cada uno en su elección son variadas e ilustran la versatilidad del lenguaje matemático.

B

J

J

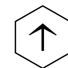
Flux of B

z y x

$$J_x = \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z}$$

$$J_y = \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial y}$$

$$J_z = \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y}$$



La ley de Ampère

Elegida por Simon Donaldson, matemático de la Universidad de Stony Brook

En lugar de escribir una sola ecuación, Donaldson trazó tres y dibujó junto a ellas un cable anudado. La corriente *J* que recorre el cable (*flechas grandes*) crea un campo magnético *B* (*flechas pequeñas*). Y las ecuaciones expresan la ley de Ampère, la cual establece las propiedades del campo magnético generado por la corriente. Junto con el dibujo, las tres expresiones reflejan la conexión entre electromagnetismo y topología, el área de las matemáticas que estudia las propiedades de los nudos y otras formas espaciales. Donaldson explica que le parece bello poner al descubierto «nuevas relaciones entre cosas que antes se creían diferentes». Al aplicar las matemáticas del electromagnetismo al estudio de los nudos, por ejemplo, los expertos han hallado nuevas formas de establecer si dos nudos de apariencia distinta son en realidad equivalentes (en el mismo sentido en que una rosquilla y una taza de café representan, en esencia, el mismo objeto, solo que deformado).

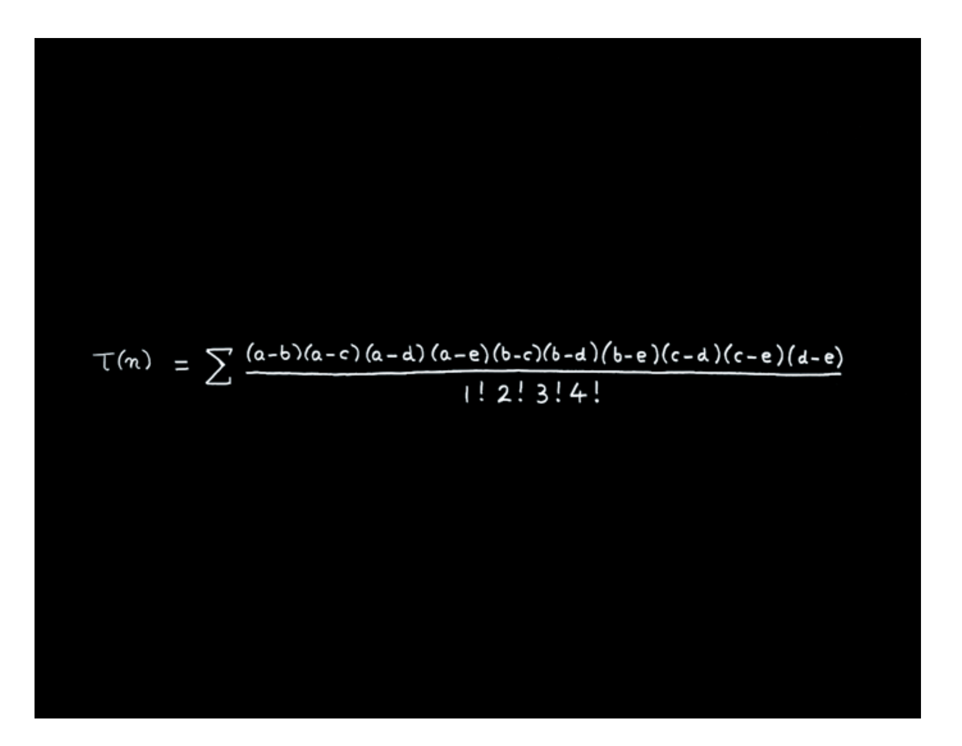
CORTESÍA DE PARASOL PRESS (*todas las ilustraciones*)

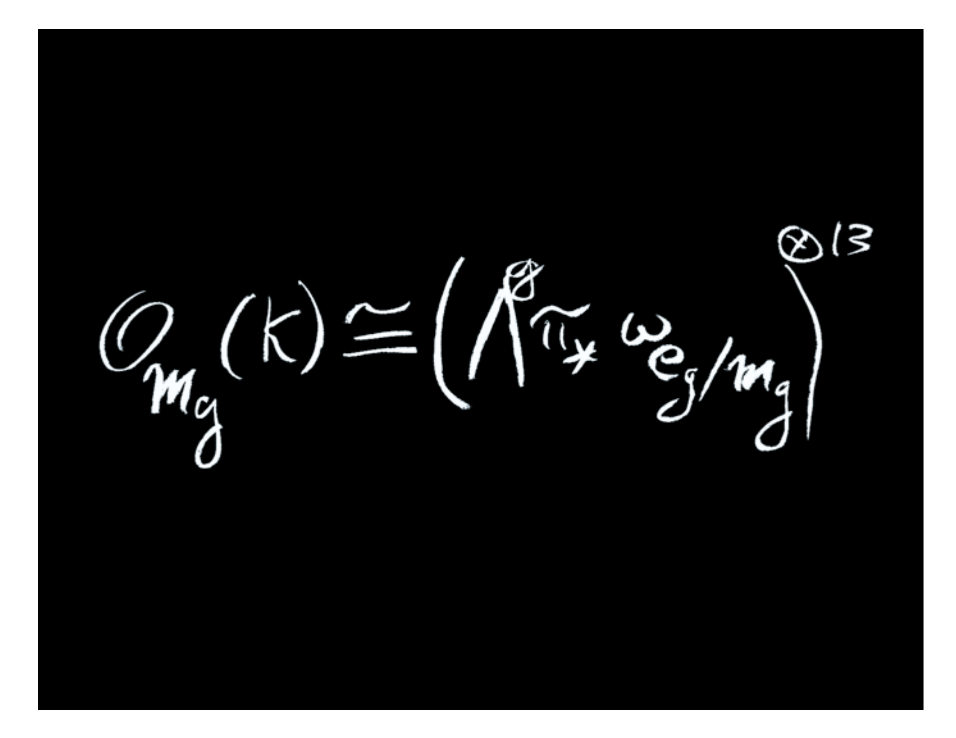


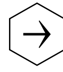
La ecuación de MacDonald

Elegida por Freeman Dyson, físico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton

Esta ecuación (la reformulación de una función clásica llamada «función tau», muy estudiada por el célebre Srinivasa Ramanujan) fue derivada por Dyson poco después de que el matemático Ian MacDonald la descubriese de forma independiente. En ella, cinco variables, *a*, *b*, *c*, *d* y *e*, aparecen restadas una de otra en diez combinaciones diferentes. Esas diferencias se multiplican entre sí y se dividen por los factoriales de los números 1, 2, 3 y 4. (El factorial de 4, por ejemplo, se expresa 4! y es igual a 1 × 2 × 3 × 4 = 24.) Dyson encuentra elegante esta ecuación por la simetría que revela entre sus distintas variables. Pero puede también considerarse bella en un sentido más indefinible: «No dice nada en particular sobre el universo; simplemente se representa a sí misma, como una pieza musical», aclara el experto. «Preguntar por su significado sería como hacerlo por el de un trío de Beethoven. Solo tienes que escucharlo.» La ecuación pertenece al área de las matemáticas conocida como teoría de números.



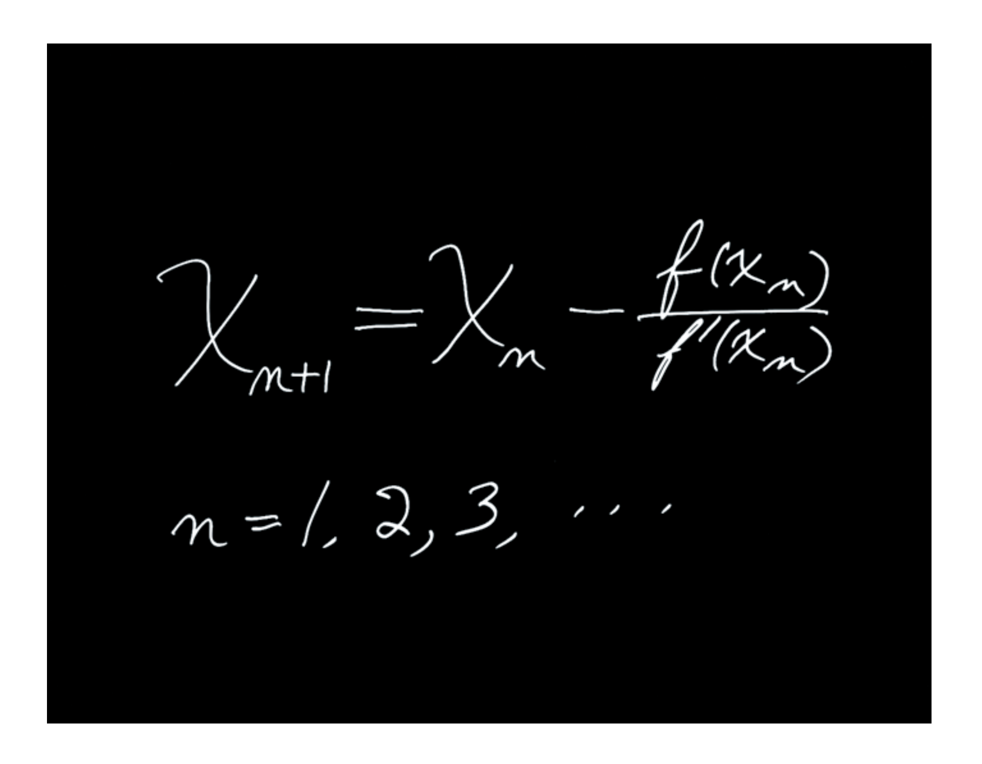


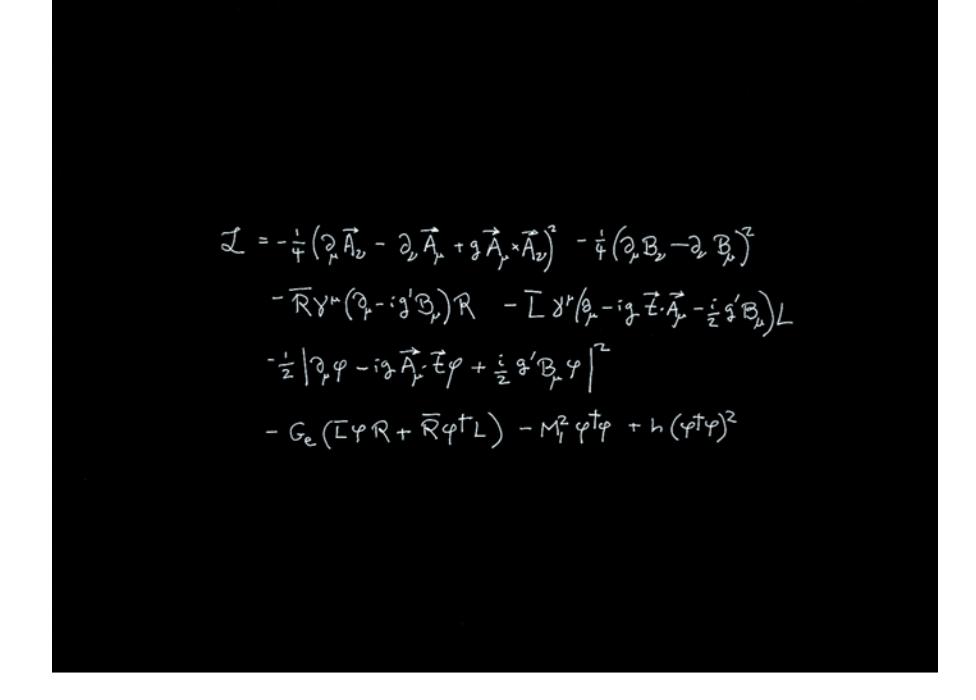


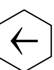
Espacio de móduli de las curvas de genus *g*

Elegida por David Mumford, matemático de la Universidad Brown

Nuestro universo solo tiene tres dimensiones espaciales, pero los matemáticos consideran a menudo espacios con muchas dimensiones más. Esta ecuación hace referencia a un espacio de 3*g* – 3 dimensiones y muestra que, si *g* es lo suficientemente grande, el espacio presentará curvatura negativa, como la superficie de una silla de montar. Mumford recuerda lo que sintió al descubrirla: «Pensé que se trataba de un resultado sorprendente, sobre todo por la aparición de ese extraño número 13». La mayoría de las expresiones matemáticas fundamentales incluyen variables, operadores y números enteros pequeños, como 1 o 2, por lo que el número 13 de su fórmula parece una aberración. Para Mumford, esa rareza la hace bella: «Como matemático, sientes que estás descubriendo hechos determinados lógicamente. Y de repente surge de la nada un número así y piensas, ¿por qué tenía que ser de *esta* manera?».



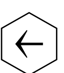




El método de Newton

Elegida por Stephen Smale, matemático de la Universidad de la Ciudad de Hong Kong

Este procedimiento sirve para encontrar aproximaciones cada vez mejores a las soluciones de una ecuación ($f(x) = 0$) que no puede resolverse de forma exacta. Para ello, se comienza con cualquier número real, x_1, y se le resta el valor de $f(x_1)$ dividido por el de la derivada, $f'(x_1)$. Cada vez que ejecutamos este paso, el resultado se acerca más a la solución. El método resulta muy práctico, a pesar de que el propio Newton carecía de una teoría sólida que explicase por qué funcionaba. Para Smale, ese misterio es lo que hace tan bella la fórmula. «Gran parte de mi trabajo está dedicado a entender la ecuación de Newton, bajo qué condiciones funciona», explica. «En mi opinión, los grandes problemas nunca se resuelven, solo se convierten en el foco de más y más trabajo.»



El lagrangiano de la teoría electrodébil

Elegida por Steven Weinberg, físico de la Universidad de Texas en Austin

Dos de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, el electromagnetismo y la interacción nuclear débil, se unifican en esta ecuación, que las muestra como dos caras de la misma moneda. La expresión, concebida por Weinberg en 1967, establece que, a cierta escala de energías, las interacciones débiles y electromagnéticas actúan como una sola; un hallazgo que más tarde le valdría el premio Nobel. Aquí $\mathcal{L}$ representa la densidad lagrangiana, una cantidad relacionada con la densidad de energía asociada a los campos de la interacción, denotados A y B. «No pienso que la forma de los símbolos escritos en esta página guarde relación alguna con su belleza», aclara Weinberg. «Es el hecho de que la teoría es rígida, que no podemos modificarla sin arruinarla, lo que la hace bella. Sus detalles quedan fijados por un principio fundamental subyacente.»

PARA SABER MÁS

Math is beautiful, but is it art? Jen Christiansen en el blog *SA Visual*, publicado en línea el 27 de enero de 2015: **blogs.scientificamerican.com/sa-visual/math-is-beautiful-but-is-it-art**
Mathematics and art: A cultural history. Lynn Gamwell. Princeton University Press, 2015.
Proyecto *Concinnitas* (incluye todas las ilustraciones): **www.concinnitasproject.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

Arte y matemáticas. Martin Gardner en *IyC*, marzo de 1978. Reeditado para «El universo matemágico de Martin Gardner», colección *Temas de IyC*, n.º 77, 2014.
La belleza de las matemáticas. Seth Newman en *MyC*, n.º 70, 2015.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito *
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia
MyC 73: La neurociencia del futuro
MyC 74: El poder de las marcas
MyC 75: Evaluar la personalidad
MyC 76: Estimulación cerebral
MyC 77: El tacto

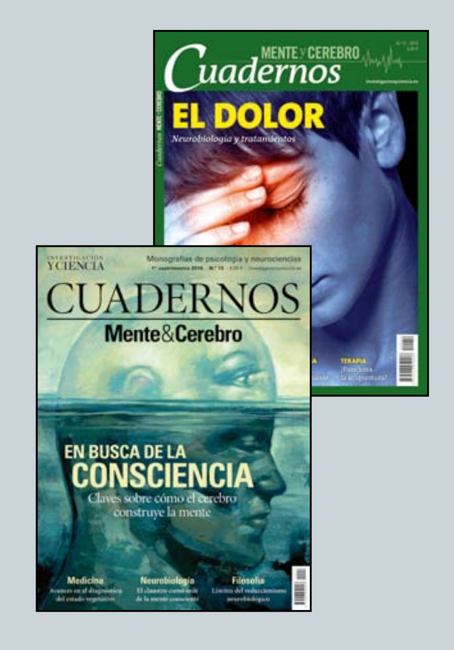
(*) Disponible solo en formato digital



MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones
Cuadernos 11: Lenguaje y comunicación
Cuadernos 12: El dolor
Cuadernos 13: En busca de la consciencia



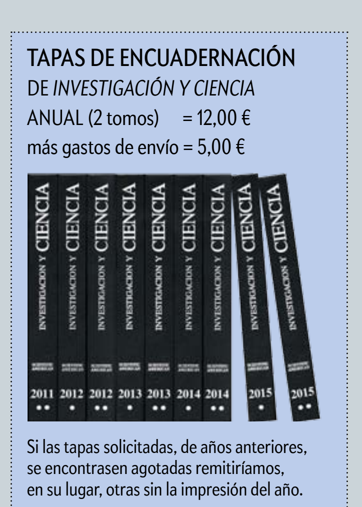


Hay disponibles ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



CATÁLOGO DE PRODUCTOS

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN
DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

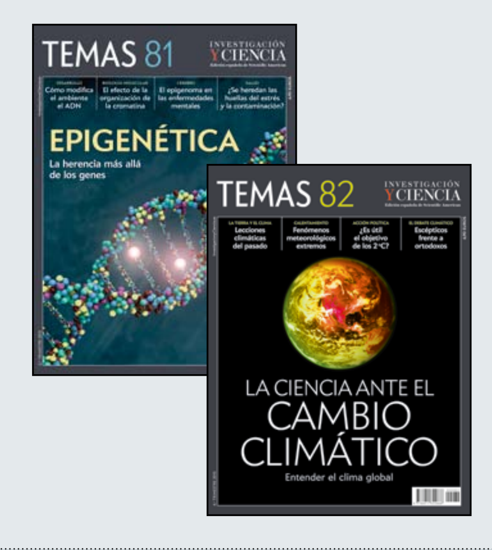


TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales *
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen? *
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer
T-80: Grandes ideas de la física
T-81: Epigenética
T-82: La ciencia ante el cambio climático

(*) Disponible solo en formato digital



GASTOS DE ENVÍO
(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar tu pedido:
Teléfono: (34) 934 143 344
A través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

por Vittorio Baglione y Daniela Canestrari

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

La cría cooperativa en las cornejas

Esta conducta es propia de las poblaciones ibéricas, cuyos jóvenes permanecen largo tiempo en su territorio natal

La corneja negra (*Corvus corone corone*) es un ave de mediano tamaño muy común en zonas abiertas y agrícolas de Europa. Como la mayor parte de las aves, suele reproducirse en parejas monógamas y sus crías se independizan por completo pocas semanas después de abandonar el nido. En la península ibérica, sin embargo, las cornejas se comportan de una forma muy diferente. Los jóvenes pueden tardar hasta cuatro años en alejarse del territorio natal. Mientras, se quedan a vivir con sus progenitores y forman una familia estable a la que ocasionalmente se unen parientes lejanos nacidos en otros territorios. En estos grupos, que pueden llegar a contar con hasta nueve miembros, los individuos no reproductores, llamados ayudantes, se dedican a colaborar en las tareas de cuidado de los nuevos polluelos, llevando comida al nido y defendiendo el territorio de los intrusos y potenciales depredadores.

La cría cooperativa ocurre en el 8 por ciento de las especies de aves y es especialmente frecuente entre los córvidos. Este comportamiento aparentemente altruista ha representado durante mucho tiempo un rompecabezas para los biólogos evolutivos. Si la selección natural «premia» a los que dejan mayor descendencia, ¿por qué persisten los ayudantes, cuyo cometido es aumentar el éxito reproductor de otros a costa del suyo propio? La respuesta a esta paradoja radica en la teoría de la selección por parentesco, la cual plantea que los individuos pueden dejar copias de sus propios genes en las siguientes generaciones tanto procreando ellos mismos como aumentando el éxito reproductor de parientes cercanos, con los que comparten un amplio porcentaje de genes [*véase* «Animales que renuncian a la reproducción», por Peter M. Buston y Marian Y. L. Wong; Investigación y Ciencia, febrero de 2016].

Las predicciones de la selección por parentesco se cumplen por completo en la corneja negra. Los ayudantes asisten solo a parientes cercanos y aumentan de manera notable su éxito reproductor. Pero ¿por qué tal conducta se da solo en la península ibérica y no en el resto de las poblaciones europeas? La respuesta la hallamos en el ambiente. Nuestro grupo ha comprobado que las cornejas ibéricas defienden sus territorios durante todo el año. Para los individuos jóvenes e inexpertos, permanecer en el territorio natal supone un mejor acceso a unos recursos que los adultos se encargan de defender. Ese fuerte incentivo para «quedarse en casa» crea las condiciones para que, a la primavera siguiente, se produzca la cría cooperativa. En las poblaciones europeas, en cambio, los adultos dejan sus territorios al final de la época de reproducción para juntarse en grandes bandos que forrajean en zonas comunes. A sus hijos, por lo tanto, no les queda más remedio que hacer lo mismo, ya que el territorio natal no ofrece ningún atractivo especial. Estos movimientos dispersivos rompen precozmente la relación paterno-filial, lo que hace imposible la cooperación en las siguientes temporadas de cría.

—Vittorio Baglione
Dpto. de ciencias agroforestales
Universidad de Valladolid
—Daniela Canestrari
Dpto. de biología de organismos y sistemas, Universidad de Oviedo



UN ADULTO interrumpe el forrajeo para controlar si hay peligros a la vista. Al haber más ojos vigilando, el grupo se encuentra mejor protegido frente a los depredadores.

CLAUDIA WASCHER (*fotografías*)

UNA CORNEJA emite reclamos desde una posición elevada. La defensa del territorio es una de las tareas en la que cooperan los miembros de la familia.





LOS POLLOS VOLANDEROS son alimentados por los adultos durante cuatro o cinco semanas después de abandonar el nido. La relación con los progenitores, sin embargo, puede mantenerse durante varios años en la población ibérica.



TRES CORNEJAS ADULTAS comparten los cuidados de dos pollos ya emplumados, que en breve abandonarán el nido.

por Alfredo Marcos

Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid.



Neurociencia: evitar el desengaño

Las expectativas desmedidas podrían dañar la investigación sobre el cerebro humano

La neurociencia ha crecido de forma espectacular desde la última década del siglo pasado. Hasta los años noventa, el acceso al conocimiento del cerebro humano se limitaba al estudio de pacientes con daño cerebral; es decir, se aprendía sobre las funciones del cerebro a través del estudio de sus disfunciones, o estados patológicos. Es famoso el caso de Phineas Gage (1823-1860), cuya personalidad cambió de manera drástica tras un accidente que le lesionó ciertas zonas ventromediales de la corteza prefrontal. Son también muy conocidas las investigaciones del neuropsicólogo ruso Alexander Luria sobre pacientes con daño cerebral. De todo ello llegó a inferirse un vínculo muy especial entre ciertas zonas del cerebro y algunas funciones conductuales.

Con el desarrollo de las de nuevas técnicas de exploración médica, sin embargo, se ha logrado estudiar el cerebro también en su estado normal de funcionamiento. Desde comienzos del siglo xx se vienen empleando para tal fin equipos electroencefalográficos cada vez más precisos. Pero el acceso a las estructuras y funciones de este complejo órgano ha mejorado de manera considerable con la llegada de diversas técnicas de neuroimagen, como la tomografía por emisión de positrones y la resonancia magnética funcional [*véase la serie de artículos* «Atlas del cerebro»; Mente y Cerebro, n.º 69, 2014].

El desarrollo de estos nuevos medios de exploración, así como de nuevas perspectivas matemáticas, informáticas y teóricas, se ha visto muy respaldado en los últimos años por las cuantiosas inversiones de diversos Gobiernos. En EE.UU. se puso en marcha en 2013 la iniciativa BRAIN, con una financiación multimillonaria. Y la UE asignó, también en 2013, cientos de millones de euros al Proyecto Cerebro Humano (HBP, por sus siglas en inglés). Esta clase de programas de investigación se enmarcan en lo que ha dado en llamarse «gran ciencia», o *big science*, la cual nació a mediados del siglo pasado con el Proyecto Manhattan. En la recta final de la centuria, el relevo lo tomó el Proyecto Genoma Humano (PGH), cuyas conclusiones se publicaron en 2003. Ahora es el turno de los proyectos de investigación sobre el cerebro.

Algo podemos aprender de esta breve historia. El PGH dejó un sabor agridulce. La secuenciación del genoma humano fue un éxito, pero no cubrió ni de lejos las desmedidas expectativas con las que se impulsó el programa, ni en el terreno médico ni en el filosófico. Algunos pensaron que pondría en nuestras manos la panacea médica y el secreto de la naturaleza humana, pero no fue así. Lo que sí nos mostró el PGH —una enseñanza muy valiosa, por cierto— es que no todo está en los genes. De este toque de humildad resultó una pléyade de ciencias *-ómicas* y, también, el impulso necesario para estudiar el cerebro humano. Pero no repitamos errores. Por mucho que aprendamos sobre el cerebro, no esperemos que nos brinde la curación inmediata de todos nuestros males médicos y sociales, desde el alzhéimer hasta la violencia, ni mucho menos las claves últimas de la existencia humana. De hecho, es esta maniobra de apuesta a expectativas infladas lo que constituye un verdadero riesgo de *brain bluff* para la neurociencia.



ADAPTADO DE ISTOCKPHOTO/KMLMTZ66

Permítaseme reproducir aquí un extracto de un artículo publicado el 2 de noviembre de 2015 en el diario *El País*, en el que el periodista científico Javier Salas informaba sobre las últimas evaluaciones de expertos acerca del HBP: «Cuando apenas ha empezado a andar, el Human Brain Project (Proyecto Cerebro Humano, HBP), que prometía simular mediante supercomputación toda la complejidad del cerebro humano, ha recibido un severo baño de realismo. Después de que cientos de neurocientíficos se alzaran en armas contra el diseño del megaproyecto —1000 millones en 10 años—, dos informes han señalado las carencias de una apuesta titánica que entusiasmó más a los políticos que a los científicos. El proyecto debe reformularse de arriba abajo». El artículo citaba la siguiente frase del informe de evaluación: «Los responsables del HBP y la Comisión Europea exageraron los objetivos y los posibles logros».

Nada ejemplifica mejor la dinámica de expectativas desmedidas, quizás orientadas a la captación de fondos, seguidas de decepción. En fecha reciente y en estas mismas páginas, Stefan Thail escribía: «A los dos años de su inicio, este proyecto multimillonario de simulación del cerebro está haciendo agua».

Al parecer, las primeras evaluaciones serias de los grandes proyectos de investigación sobre el cerebro humano ya están arrojando conclusiones desalentadoras para quienes han puesto en ellos excesiva ilusión. La situación es hoy muy inestable y ha cambiado considerablemente entre 2013 y 2015. Tras la neuromanía, parece que ahora empieza a formarse una ola de neuroescepticismo, que quizá también acabe por resultar excesiva. Reconozcamos, pues, el valor limitado pero muy real de los nuevos datos. Al margen de la deslumbrante calidad estética de las neuroimágenes, la información que aportan sobre el funcionamiento del cerebro puede resultar de extraordinario valor, pero siempre que no se sobreinterprete ni se caiga en una suerte de neofrenología.

Los grandes proyectos científicos dependen de manera crítica de factores mediáticos, políticos y financieros. Parece que esto inclina a sus promotores a formular, o al menos a sugerir, promesas y expectativas desmedidas. De ahí a la frustración va solo un paso. Y dicha frustración puede llevarse consigo las aportaciones, quizá más modestas, pero reales y muy valiosas, que tales proyectos hacen al avance de la ciencia y de la humanidad. De hecho, la iniciativa BRAIN parece estar funcionando mejor gracias a un planteamiento inicial más moderado. BRAIN es, en realidad, un nombre genérico bajo el que se gestionan numerosos proyectos de tamaño medio relacionados con la monitorización del cerebro y la estimulación localizada de neuronas. Y precisamente hacia objetivos más modestos, de carácter tecnológico e informático, parece estar reorientándose ahora el HBP.

Con todo, también en el otro lado del Atlántico está creciendo el neuroescepticismo. Resulta llamativa la atención que recibió en EE.UU un libro tan claramente neuroescéptico como *Brainwashed: The seductive appeal of mindless neuroscience* (2013), de la psiquiatra Sally Satel y el psicólogo Scott Lilienfeld. La reseña del *New Yorker* (19/06/2013), firmada por el investigador Gary Marcus, advertía que las neurociencias son y serán útiles siempre que cooperen con otras ciencias, como la psicología o la psiquiatría, dado que «los elementos básicos de la psicología, como las creencias, deseos, fines y pensamientos, seguirán probablemente para siempre desempeñando un papel clave para entender el comportamiento humano». Por su parte, el analista David Brooks afirmaba en *The New York Times* (17/06/2013) que la neurociencia no podrá sustituir, como a veces se ha sugerido, a las disciplinas humanísticas. Es más, resultará valiosa en la medida en que quiera colaborar con ellas. Brooks reconocía que las neurociencias conforman un campo «increíblemente importante y apasionante», pero que no podrán aportar la clave única para entender «todo pensamiento y comportamiento».

Desde la filosofía podemos aportar alguna reflexión constructiva a la situación actual. Se trata con ello de evitar los extremos de la neuromanía que veníamos sufriendo hasta hace un par de años, pero también los del neuroescepticismo que hoy asoma en el horizonte. Podemos evitar ambos excesos apelando al nivel profundo de la antropología filosófica; es decir, apoyándonos en una idea adecuada de ser humano.

Para empezar, el intento de reducir todo lo humano al cerebro nos hace olvidar la complejidad del cuerpo en su conjunto, así como sus interacciones con el medio natural, social y cultural. Del mismo modo que para entender el funcionamiento de los genes hemos tenido que ir más allá de estos y llegar a la epigenética, probablemente debamos emprender estudios *epicerebrales* que, para comprender el funcionamiento del cerebro, acaben incluyendo al organismo y sus entornos. El genocentrismo conoce hoy horas bajas, y algo similar empieza a ocurrir con el *cerebrocentrismo*. El cerebro no percibe, ni piensa, ni decide, ni recuerda: todo eso lo hacen las personas. Por más que, evidentemente, estas lo logren gracias, entre otras cosas, a su cerebro.

Nuestra intrincada trama de neuronas condiciona nuestro pensamiento y comportamiento, al mismo tiempo que los posibilita, pero no los determina por completo. Ni siquiera la física acepta hoy el determinismo que fue moda en tiempos de Laplace. Así pues, dado que las personas somos mucho más que un cerebro y un conjunto de neuronas, ni nuestro pensamiento ni nuestro comportamiento podrán ser descifrados únicamente a partir de las neurociencias. Pero, dado que nuestra base fisiológica es condición necesaria de ambos, tampoco podremos prescindir de las neurociencias si queremos entenderlos a fondo.

Reducir todo lo humano al cerebro implica olvidar, por lo pronto, el resto del organismo, así como a la persona en su conjunto, entendida como un todo integrado. En consecuencia, parece recomendable una interpretación y un cultivo de las neurociencias en *modo co-*; es decir, en comunicación y colaboración respetuosa con otras muchas disciplinas, en lugar de una neurociencia en *modo su-*, cuya aspiración sería la de sustituir y suceder a las disciplinas humanísticas.

La neuroética, por poner un ejemplo, será el campo en el que se comuniquen y cooperen las neurociencias y la ética, desde el mutuo respeto a sus respectivas identidades y metodologías. Sería un error, que probablemente conduciría a la frustración, interpretar la neuroética como la disciplina neurocientífica llamada a reemplazar a la ética filosófica. Semejante sustitución sería más bien una simple suplantación de la ética, tal y como esta se ha entendido tradicionalmente, por un sucedáneo. Algo parecido vale para el neuroderecho, la neuroeconomía, la neuroestética, el neuroarte, la neurofilosofía, el neuromárketing, la neuroteología, la neuromedicina, la neurolingüística, la neuropsicología, la neuropsiquiatría, la neurosociología, la neuropedagogía, la neuropolítica...

Mientras que la neurociencia entendida en *modo su-* no augura sino frustración, la neurociencia en *modo co-* tiene un gran valor ya en el presente y promete un futuro muy esperanzador, pues nos ayudará a conocer buena parte de las condiciones de posibilidad de nuestro comportamiento y de nuestro pensamiento. ■

PARA SABER MÁS

Neuroética y neuropolítica. Adela Cortina. Tecnos, 2011.
Brainwashed: The seductive appeal of mindless neuroscience. Sally Satel y Scott O. Lilienfeld. Basic Books, 2013.
Aping mankind: Neuromania, darwinitis and the misrepresentation of humanity. Raymond Tallis. Routledge, 2014.
Neuroética y vulnerabilidad humana. Alfredo Marcos en *Cuadernos de Bioética*, vol. 26, págs. 397-414, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El lenguaje de la neurociencia. Christian Wolf en *MyC*, n.º 70, 2015.
Las dificultades del Proyecto Cerebro Humano. Stefan Theil en *IyC*, diciembre de 2015.
Una ciencia controvertida. Steve Ayan en *MyC*, n.º 73, 2015.
Nueve ideas para mejorar la neurociencia. Isabelle Bareither, Felix Hasler y Anna Strasser en *MyC*, n.º 73, 2015.
La consciencia: ¿solo un montón de neuronas? Manuela Lenzen en *MyC*, n.º 76, 2016.

por Nathan Myhrvold



Nathan Myhrvold es fundador y consejero delegado de Intellectual Ventures, en Bellevue, Washington. Anteriormente trabajó para Microsoft como director de tecnología y creó Microsoft Research.

¿Quién debe financiar la investigación básica?

Si los Gobiernos no destinan recursos a ella, la ciencia se estancará

El 2 de diciembre de 2015, centenario de la publicación de la teoría de la relatividad general de Einstein, aficionados a la ciencia de todas partes reflexionaban sobre este asombroso acto de genialidad. Sin embargo, no es que la teoría naciera en un momento de inspiración, ya formulada por completo. Albert Einstein trabajó en ella durante años. Finalmente se vio empujado a concluirla por una feroz rivalidad (dentro de cierto compañerismo) que mantenía con el matemático David Hilbert [*véase* «Einstein y la invención de la realidad», por Walter Isaacson; Investigación y Ciencia, noviembre de 2015].

Si se examina la historia detallada de casi cualquier descubrimiento científico o invento tecnológico icónico —la bombilla, el transistor, el ADN, incluso Internet—, uno se encuentra con que los nombres famosos a los que se atribuye el logro tan solo iban unos pocos pasos por delante de un grupo de competidores. Recientemente, algunos autores y dirigentes electos han usado este fenómeno, denominado innovación paralela, para defender posturas en contra de la financiación pública de la investigación básica.

El divulgador británico Matt Ridley, por ejemplo, afirma en su nuevo libro, *The evolution of everything* (Harper, 2015), que los Gobiernos se interponen en el camino de la evolución natural de la ciencia y la invención. Numerosos miembros del Congreso de Estados Unidos se muestran de acuerdo. Se destina demasiado dinero de los contribuyentes a la ciencia, declaran algunos políticos. El Gobierno debería desentenderse y dejar que las empresas financien las investigaciones que necesiten.

Esos argumentos incurren en un peligroso error. Sin ayudas públicas, gran parte de la investigación científica básica jamás se produciría. Y eso a pesar de que ha brindado inmensos beneficios intelectuales, como el trabajo que nos ha traído el bosón de Higgs, el conocimiento de que un agujero negro supermasivo ocupa el centro de la Vía Láctea, o el descubrimiento de mares de metano en la superficie de la luna de Saturno Titán. Este tipo de estudios solían llevarse a cabo en las instalaciones de investigación de las empresas: la prueba experimental de la gran explosión (*big bang*) se halló en los Laboratorios Bell, de AT&T, lo cual desembocó en un premio Nobel. Generó prestigio, pero no fue rentable. Esos días ya han pasado.

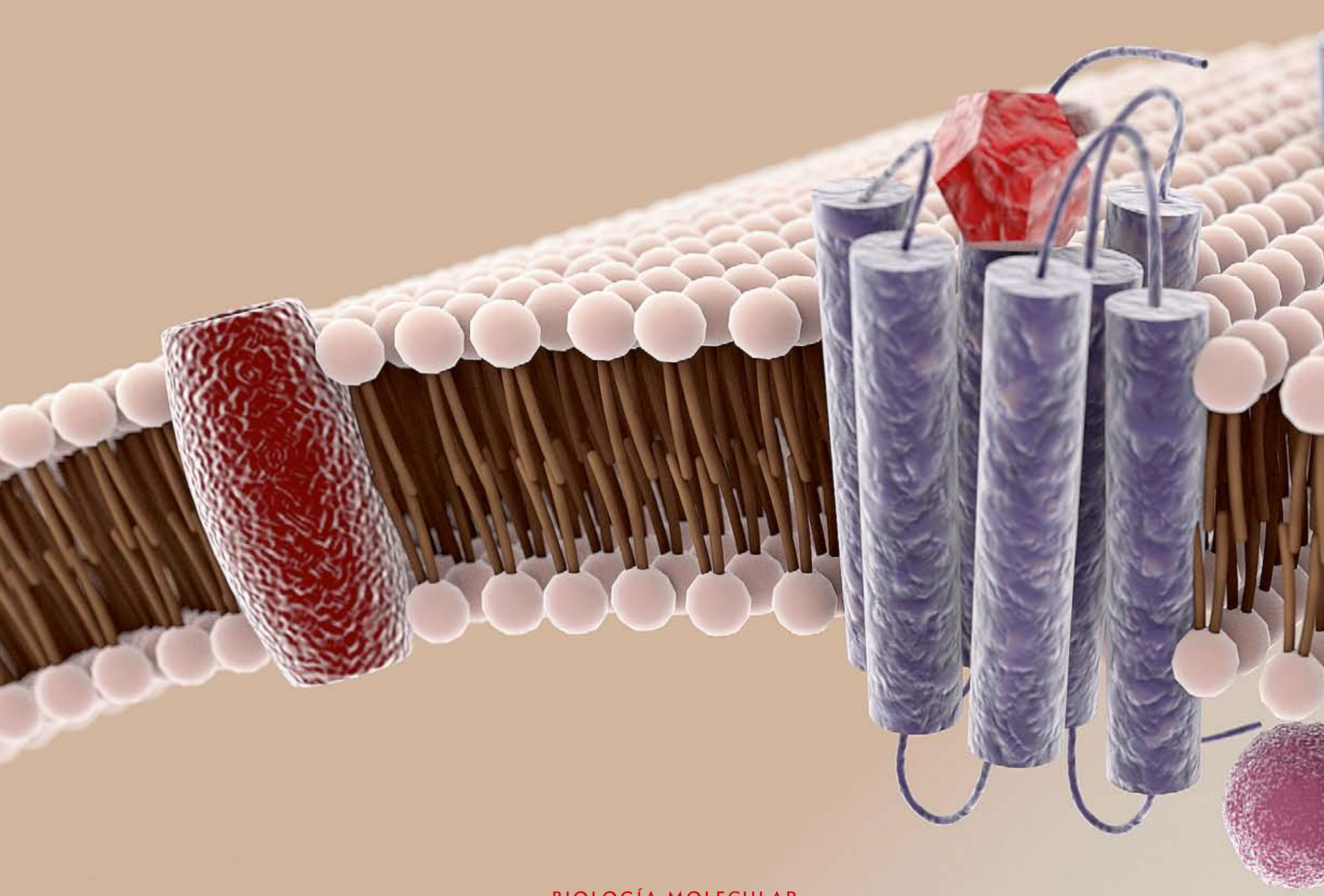
En la actualidad, incluso en disciplinas aplicadas tales como computación o ciencia de materiales, las empresas consideran que la investigación básica es una forma de caridad; así pues, la evitan. Científicos de los Laboratorios Bell crearon el transistor, pero el dispositivo reportó miles de millones a Intel (y a Microsoft). Ingenieros en Xerox PARC desarrollaron la interfaz gráfica de usuario moderna, aunque las mayores ganancias las obtuvo Apple (y también Microsoft). Investigadores de IBM fueron pioneros en la aplicación del efecto de magnetorresistencia gigante para aumentar la capacidad de los discos duros, pero pronto Seagate y Western Digital se adueñaron del mercado.



Cuando creé Microsoft Research, uno de los mayores centros de investigación industrial fundados en una generación, Bill Gates y yo teníamos muy claro que nuestra misión no era la investigación básica. Sabíamos que no seríamos capaces de justificar el presupuesto de I+D ante los inversores a menos que nuestros investigadores se centraran específicamente en innovaciones que pudieran traducirse pronto en ingresos. La lógica empresarial imperante aquí no ha variado. Pecan de ingenuidad quienes crean que las compañías con fines de lucro pagarán de manera altruista una ciencia básica que redunde en múltiples y variados beneficios, principalmente para otros y a largo plazo.

Si el Gobierno dejara la financiación de la investigación básica en manos del sector privado, gran parte de la ciencia sufriría un frenazo. Los proyectos que sobrevivieran se realizarían en buena medida en secreto por miedo a entregar el próximo gran invento a un rival. En tal situación, puede que Einstein no hubiera sentido nunca la necesidad de culminar su mayor obra.

Los Einsteins escasean y no aparecen con frecuencia. Sin embargo, no cabe esperar a que surja un genio excepcional mientras avivemos los instintos competitivos de las personas más inteligentes de nuestro entorno y las convenzamos de que compartan sus descubrimientos a cambio de una oportunidad de alcanzar gloria y riquezas.

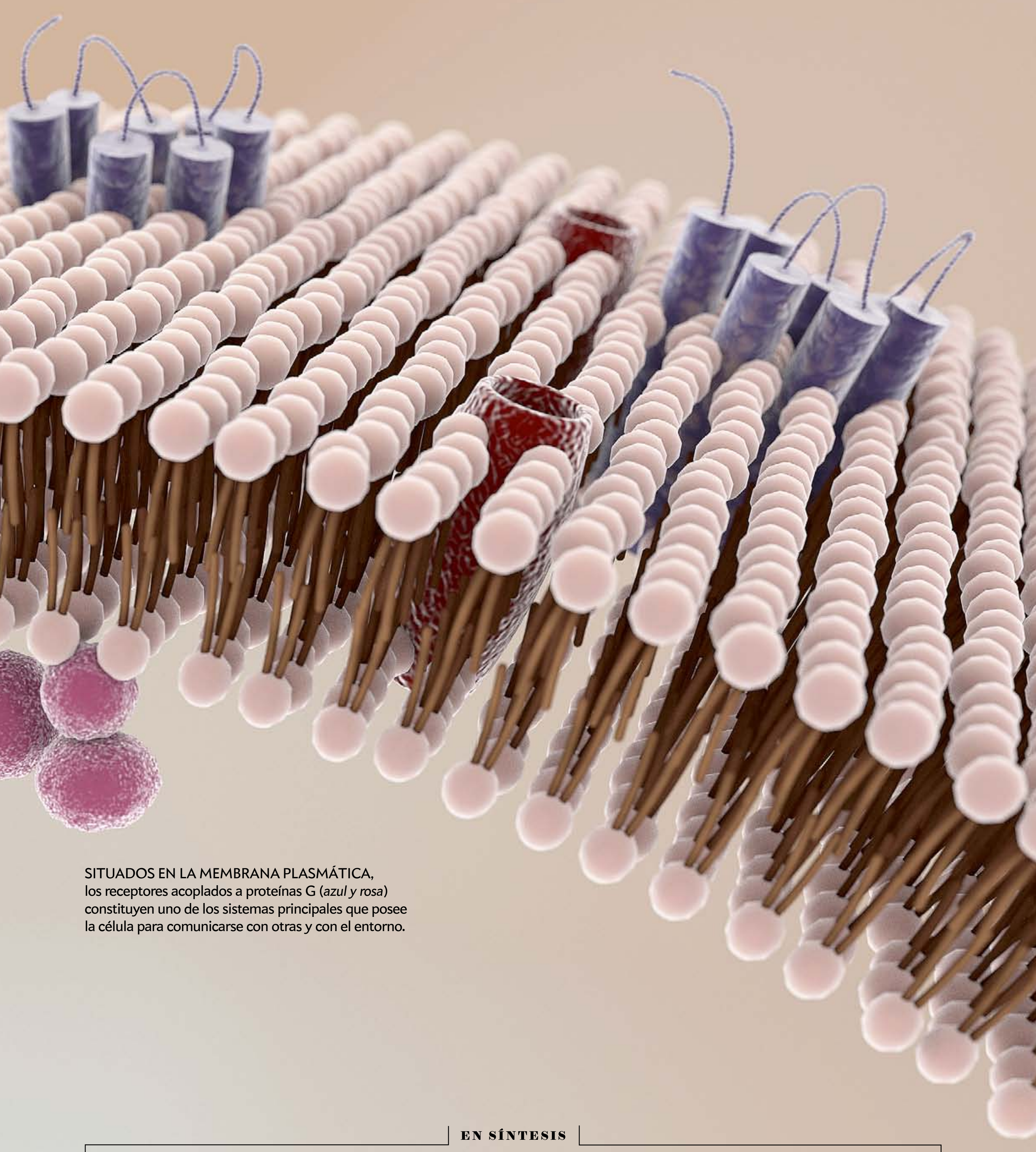


BIOLOGÍA MOLECULAR

ARQUITECTOS DE LA COMUNICACIÓN CELULAR

Los receptores acoplados a proteínas G de las células median la mayoría de nuestras respuestas fisiológicas. Su versatilidad y potencial terapéutico siguen fascinando a los expertos

Javier González Maeso



SITUADOS EN LA MEMBRANA PLASMÁTICA, los receptores acoplados a proteínas G (*azul y rosa*) constituyen uno de los sistemas principales que posee la célula para comunicarse con otras y con el entorno.

EN SÍNTESIS

Los receptores acoplados a proteínas G (RAPG), presentes en la membrana plasmática de las células, median la mayor parte de nuestras respuestas fisiológicas a hormonas, neurotransmisores y estímulos ambientales.

Los diferentes tipos de RAPG constituyen también la diana directa o indirecta de la mayoría de los fármacos y de numerosas drogas, como la heroína, el cannabis y el alucinógeno LSD.

Aunque estos receptores atrajeron la atención de los farmacólogos desde los comienzos del siglo pasado, ha sido durante la última década cuando hemos visto un espectacular avance en el conocimiento de su biofísica, estructura tridimensional y función.

Los nuevos hallazgos han ayudado a entender con mayor detalle los mecanismos moleculares que permiten a las células comunicarse entre sí y mantener el equilibrio dinámico que se necesita en cualquier proceso fisiológico.

Javier González Maeso es profesor de fisiología y biofísica en la Universidad de Virginia Commonwealth. Su grupo de investigación está interesado en la estructura y la función de los receptores acoplados a proteínas G, así como en su implicación en enfermedades psiquiátricas como la esquizofrenia.



El cuerpo humano está constituido por unos treinta y cinco billones de células que se especializan en diferentes tipos para formar parte de los órganos y tejidos. Cada uno de los tipos celulares desempeña una función particular y, al trabajar en equipo y de forma coordinada con el resto de las células del organismo, logran mantener un equilibrio dinámico, denominado homeostasis, durante un período definido de tiempo al que llamamos vida.

Para mantener ese equilibrio es necesario un sistema coordinado de comunicación entre los distintos tipos de células. La vida de un organismo multicelular no sería posible sin la existencia de un mecanismo molecular que permitiera a sus billones de células comunicarse entre sí. A modo de comparación, de poco serviría el trabajo y la producción de las distintas profesiones en una ciudad o un pueblo si los individuos que llevan a cabo estas profesiones no se pudieran comunicar entre sí.

En un organismo multicelular, la comunicación entre las células está mediada, bien por moléculas que transmiten información de una célula a otro grupo de células, o bien por proteínas que funcionan a modo de «antenas» y reciben las señales externas en la superficie celular. Este grupo de proteínas se denominan receptores y se clasifican en tres grandes grupos según su manera de funcionar.

El primer grupo corresponde a los canales iónicos, los cuales, localizados en la membrana plasmática, abren o cierran su paso a iones tales como el calcio (Ca^{2+}), el sodio (Na^{2+}) o el cloro (Cl^{-}). El segundo grupo, conocido como receptores enzimáticos, está formado por proteínas, situadas también en la membrana, que tienen la capacidad de unirse a un ligando (molécula encargada de transmitir una señal o información desde otra célula) y de generar, a través de una reacción química, moléculas que actúan como transmisoras de esa señal en el interior de la célula.

El tercer grupo está constituido por los receptores acoplados a proteínas G (o RAPG). Despiertan particular interés porque intervienen en un sinfín de procesos de señalización (comunicación) intercelular y también en la percepción de los estímulos ambientales. Entre los distintos tipos de señales que reciben cabe destacar las hormonas, los neurotransmisores, los péptidos, los iones y las sustancias lipídicas, así como los estímulos sensoriales tales como la luz, los olores y los sabores.

La estructura de los RAPG, formada por siete segmentos transmembranales, constituye un modelo ventajoso y extraor-

HISTORIA

El largo camino

Principales fases que han llevado al descubrimiento de los receptores acoplados a proteínas G y a identificar su estructura y función.

1665
Robert Hooke
Acuñó el término *célula* tras observar al microscopio láminas de corcho.

1909
John Langley
Propuso la existencia de «sustancias receptoras», responsables de la contracción del músculo en la rana.

1913
Paul Ehrlich
Sugirió que los compuestos químicos con efectos terapéuticos necesitaban unirse a algún receptor.



1914
Henry Dale
Comparó los efectos de la nicotina y la muscarina con los de la acetilcolina en la presión sanguínea del gato.

1920
Otto Loewi
Mostró por primera vez la transmisión de información entre dos tejidos.

dinariamente moldeable y, a lo largo de la evolución, ha sabido adaptarse a las numerosas necesidades requeridas por los mecanismos de señalización entre los distintos tipos de células de los organismos. Debido a esa peculiaridad, estos receptores han atraído el interés de la industria farmacéutica, que ha buscado compuestos capaces de modificar su función. De este modo, los RAPG son la diana directa o indirecta de más del 50 por ciento de los fármacos; y alrededor de la cuarta parte de los cien fármacos más vendidos van dirigidos a ellos.

Aunque el concepto de RAPG, tal y como lo conocemos en la actualidad, fue descrito en la década de los setenta del siglo pasado, en los últimos años hemos sido testigos de avances que han devuelto el foco de atención a este tipo de receptores, en los que centran sus esfuerzos un gran número de grupos de investigación.

HISTORIA DEL DESCUBRIMIENTO

El concepto de célula, la unidad anatómica fundamental de todos los organismos vivos, fue acuñado por el británico Robert Hooke en 1665 en su obra *Micrographia*. Sin embargo, hubo que esperar más de doscientos años hasta que comenzó a entenderse la forma en que las células se comunicaban entre sí. De este modo, John N. Langley, de la Universidad de Cambridge, al utilizar como modelo experimental músculo de rana, propuso en 1909 que la contracción muscular que se producía al administrar nicotina se debía a la presencia de «sustancias receptoras». Estos resultados fueron los primeros que aludieron a la idea de «receptor celular». Solo unos años más tarde, en 1913, Paul Ehrlich, de la Universidad de Leipzig y galardonado con el premio Nobel en 1906, formuló la máxima en latín *corpora non agunt nisi fixata*, que puede traducirse como «ninguna sustancia es [biológicamente] activa a no ser que se una [a un receptor]». Poco después, se propuso la primera clasificación de los receptores, que se basaba en la descripción de los efectos funcionales o fisiológicos que producían diferentes fármacos en un determinado modelo experimental.

En concreto, Henry H. Dale, del Colegio Universitario de Londres, se fijó en la acetilcolina. Se sabía que este compuesto, identificado por primera vez en el extracto del hongo cornezuelo del centeno (*Claviceps purpurea*), se expresaba también en tejidos de mamífero, por lo que Dale se interesó por los efectos que ejercía en la fisiología de un organismo. En 1914, al emplear como modelo la presión sanguínea de un gato, descubrió que los efectos de la acetilcolina se asemejaban a los del alcaloide muscarina (compuesto presente en hongos como *Amanita muscaria*). También demostró que la actividad farmacológica de la acetilcolina era similar a los efectos fisiológicos inducidos por la estimulación del sistema nervioso parasimpático.

Basándose en cómo distintos compuestos modulaban la respuesta fisiológica, Dale definió dos grupos de receptores de la acetilcolina: los muscarínicos (estimulados por la muscarina) y los nicotínicos (estimulados por la nicotina, un compuesto extraído de las hojas de tabaco). En estos últimos, los efectos de la acetilcolina podían ser inducidos por la nicotina, o bien inhibidos por la atropina (compuesto extraído de la planta belladona, *Atropa belladonna*).

Sin embargo, aun teniendo en cuenta la importancia de estos hallazgos, el mecanismo fisiológico mediante el cual se transmite una señal de una célula a otra no se descubrió hasta unos años más tarde. Fue Otto Loewi, de la Universidad de Marburgo, quien demostró en 1920 el concepto de transmisión química de la información. Con anterioridad se había descrito que la estimulación mecánica del nervio vago disminuía la frecuencia cardíaca. Partiendo de ese modelo, Loewi colocó dos corazones de rana en un mismo baño experimental y comprobó que la estimulación del nervio vago de uno de los dos órganos disminuía la frecuencia no solo del corazón que estaba siendo estimulado, sino también la del segundo. Denominó *Vagusstoff* (que en alemán significa «sustancia del vago») a la sustancia responsable de ese efecto, la cual fue identificada, años más tarde, como acetilcolina.

Los hallazgos de Dale y Loewi, quienes recibieron conjuntamente el premio Nobel de fisiología o medicina en 1936, representan la primera demostración experimental del concepto que posteriormente se utilizó para la clasificación farmacológica y funcional de los diferentes receptores de hormonas y neurotransmisores.

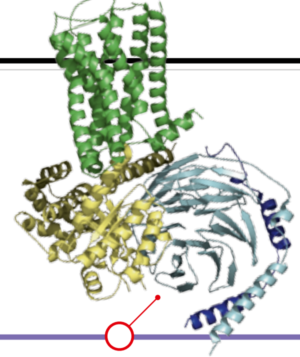
Uno de los primeros ejemplos de ese tipo de clasificación fue realizado por el farmacólogo Raymond Ahlquist, del Colegio Médico de Georgia, quien se fijó en los receptores adrenérgicos (a los que se unen los neurotransmisores adrenalina y noradrenalina). El científico razonó que los efectos inducidos por diferentes fármacos en varios de los tejidos y modelos experimentales no podían ser explicados únicamente por la existencia

1948
Raymond Ahlquist
Realizó la clasificación farmacológica de los receptores adrenérgicos en receptores α y β.

1971 - 1980
Martin Rodbell y Alfred Gilman
Descubrieron las proteínas G.

1986
Robert Lefkowitz
Determinó la estructura primaria (secuencia genética) del receptor adrenérgico β_2.

2000
Krzysztof Palczewski
Describió la estructura terciaria (tridimensional cristalina) del receptor rodopsina.



2011
Brian Kobilka
Identificó la estructura terciaria del receptor adrenérgico β_2 (*verde*) acoplado a las tres subunidades de la proteína G (*otros colores*).

2013
Mark von Zastrow
Descubrió el acoplamiento entre receptor y proteína G en vesículas intracelulares.

CORTESÍA DEL AUTOR (*proteína G*)

de dos tipos de transmisores (la adrenalina y la noradrenalina). En lugar de ello, propuso que tales efectos se observaban como consecuencia de la mayor o menor afinidad de los fármacos por dos tipos de receptores adrenérgicos, que clasificó en receptores adrenérgicos α y β.

Después de esos avances, siguieron varias décadas en las que se describieron numerosos tipos y subtipos de receptores, que se clasificaron principalmente según su perfil farmacológico. En la actualidad se han identificado unos 800 tipos de RAPG, los cuales representan el mayor grupo de proteínas de membrana en el genoma humano.

ESTRUCTURA DE LOS RECEPTORES

Los RAPG tienen en común un patrón estructural que consiste en siete segmentos proteicos en forma de hélices α (la hélice α es una de las dos posibles estructuras secundarias que adoptan las cadenas de aminoácidos para formar las proteínas) que atraviesan la membrana plasmática en la superficie celular. La utilidad funcional de este modelo estructural queda demostrada por su extraordinaria conservación a lo largo de la evolución. Los RAPG se presentan no solo en plantas y animales multicelulares triblásticos (en los que se incluyen las aves y los mamíferos), sino también en levaduras, protozoos y animales multicelulares diblásticos (como esponjas, pólipos y medusas).

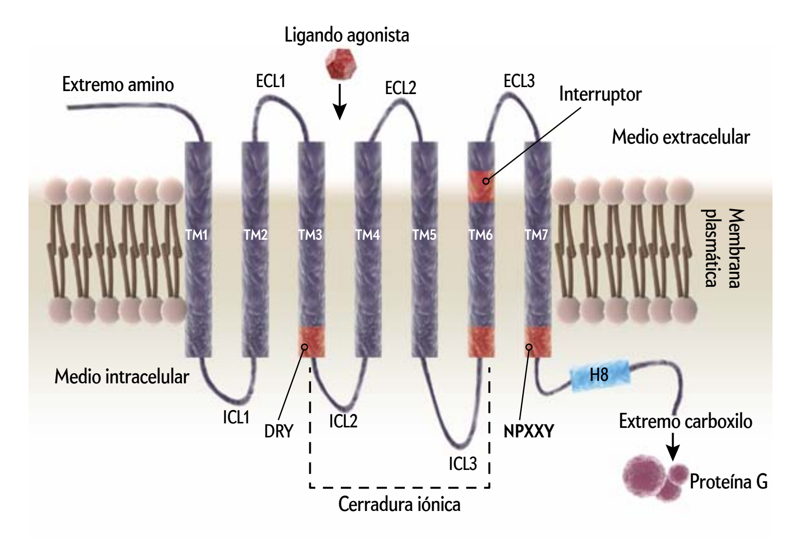
La estructura proteica tridimensional de los RAPG (el modo en que se pliegan espacialmente) se asemeja a la de la bacteriorrodopsina, una bomba de protones en la membrana de la arqueobacteria *Halobacterium halobium* que se encarga de captar la energía de la luz para transformarla en energía química (la cual puede utilizarse más tarde en las funciones celulares). La estructura tridimensional de la bacteriorrodopsina, identificada mediante microscopía electrónica, se utilizó como modelo para describir la de los RAPG. De este modo, Robert Lefkowitz, de la Universidad Duke, logró en 1986 la clonación del primer gen responsable de la expresión de un RAPG (el receptor adrenérgico β_2). Determinó la estructura primaria (secuencia de aminoácidos) del receptor y propuso por primera vez que estas proteínas exhibían un patrón estructural característico formado por siete segmentos transmembranales. A partir de entonces, tal patrón se identificó en numerosos otros receptores, lo cual confirmó que este tipo de estructura se halla altamente conservada en la familia de los RAPG.

Actualmente, según la Asociación Internacional de Farmacología (más conocida por sus siglas inglesas IUPHAR), los centenares de tipos y subtipos de RAPG están clasificados en tres grandes familias. La primera incluye los receptores similares a la rodopsina (receptor de los fotones en la retina), así como los receptores de la serotonina, de la dopamina y de la adrenalina, entre otros. En esta familia se han descrito hasta el momento 31 grupos de receptores con hasta 13 miembros cada uno (como en el caso de los receptores de la serotonina). Los receptores similares al receptor del glucagón (hormona peptídica) forman parte de la segunda familia, mientras que los receptores similares al receptor metabotrópico del glutamato (principal neurotransmisor en el sistema nervioso central) constituyen la tercera.

RAPG	Ligando nativo o endógeno	Localización	Fármacos y compuestos bioactivos
Rodopsina	Fotones	Retina	Ninguno todavía
Olfativo	Varios	Epitelio olfativo (nariz)	Sustancias odoríferas
Gustativo	Varios	Epitelio gustativo (lengua)	Estimulantes gustativos
Muscarínico $M_{1\text{-}5}$	Acetilcolina	Numerosos tejidos y órganos	Atropina (extraído de la planta belladona; dilatación de la pupila)
Adrenérgico α_{2A}	Adrenalina	Cerebro y plaquetas	Clonidina (hipertensión)
Adrenérgico β_2	Adrenalina	Vasos sanguíneos	Salbutamol (espasmos bronquiales)
Dopamina D_2	Dopamina	Cerebro (núcleo estriado)	Haloperidol (esquizofrenia)
Histamina H_1	Histamina	Sistema inmunitario	Difenhidramina (antialérgico)
Serotonina 5-HT_{1A}	Serotonina	Cerebro (hipocampo y núcleo dorsal del rafe)	Fluoxetina (inhibidor de la recaptación de serotonina; antidepresivo)
Serotonina 5-HT_{2A}	Serotonina	Cerebro (corteza frontal)	LSD, mescalina y psilocibina (alucinógenos)
Quimiocina	Varios	Sistema inmunitario	Ligandos quimiotácticos
Melatonina MT_1	Melatonina	Glándula pituitaria	Ramelteón (trastornos del sueño)
Opioide μ	Endorfinas	Cerebro y médula espinal	Morfina (analgésico)
Cannabinoide CB_1	Anandamida	Cerebro	Tetrahidrocannabinol (constituyente psicoactivo del cannabis)

VARIEDAD DE RECEPTORES Y FUNCIONES: Los distintos tipos de receptores acoplados a proteínas G, su localización anatómica en el organismo y las sustancias que los activan (ligandos) dan lugar a un amplio abanico de funciones fisiológicas que pueden ser moduladas por distintos fármacos y compuestos bioactivos. Arriba se enumeran algunos ejemplos.

A pesar de la importancia de esos avances, tuvimos que esperar hasta el año 2000 para conocer la estructura tridimensional detallada de un RAPG. Utilizando la difracción de los rayos X a través de los átomos de una proteína en su forma cristalizada, Krzysztof Palczewski, de la Universidad Case Western Reserve, publicó la estructura atómica tridimensional del RAPG rodopsina con una resolución de 2,8 ángstroms (Å). Unos años más tarde, en 2007, Brian Kobilka y su equipo de la Universidad Stanford mostraron la estructura cristalina del receptor adrenérgico β_2 con una resolución de aproximadamente 3,5 Å. Estos dos trabajos, además de otros recientes, revelaron detalles estructurales relacionados con la organización topológica de los RAPG, así como el mecanismo por el cual los fármacos denominados agonistas (ligandos que activan el receptor) pueden modificar la estructura de los RAPG y dar lugar a las distintas vías de señalización intracelular. Por tales avances, Kobilka fue galardonado, junto con Lefkowitz, con el premio Nobel de química en 2012.



ESTRUCTURA Y ACTIVACIÓN DEL RECEPTOR: Los RAPG están formados por siete segmentos proteicos que atraviesan la membrana plasmática. Este esquema muestra la posición de los principales elementos estructurales del receptor, como los extremos amino (extracelular) y carboxilo (intracelular), sus tres bucles extracelulares (ECL) e intracelulares (ICL), así como su hélice α (H8) cercana a su extremo carboxilo. La unión de la sustancia agonista con el receptor provoca en este cambios biofísicos y movimientos estructurales en los que están implicados el dominio DRY del tercer segmento transmembranal (TM3), la zona conocida como interruptor en el sexto segmento (TM6), y la interacción, o cerradura iónica, entre las partes intracelulares de los segmentos tres y seis (TM3 y TM6). Tales movimientos llevan a la activación de las proteínas G.

Los nuevos detalles estructurales confirmaron la existencia de los extremos extracelular e intracelular de los receptores, correspondientes a los grupos amino y carboxilo, ya descritos anteriormente. También demostraron la localización tridimensional y detallada de dos zonas proteicas (también llamadas dominios) que desempeñan un papel clave en la actividad del receptor. La primera de ellas, el dominio DRY, está formada por los aminoácidos aspártico, arginina y tirosina y se localiza entre el segmento transmembranal 3 y el segundo bucle intracelular. Los modelos estructurales mostraron la presencia de una interacción polar entre la arginina (cargada positivamente) del dominio DRY y el aminoácido glutamato (cargado negativamente) situado en la zona intracelular del segmento trasmembranal 6. Esta interacción, a la que se denominó cerradura iónica, es responsable de la estabilización de la estructura inactiva del receptor.

El segundo de los dominios importantes, denominado H8, está asociado al extremo intracelular carboxilo. Así, el estudio de la estructura cristalina del receptor reveló que este dominio adopta una conformación en espiral, o hélice α, que, junto con el motivo NPXXY, formado por los aminoácidos asparagina, prolina y tirosina y situado en la zona intracelular del segmento transmembranal 7, desempeña un papel fundamental en el proceso por el que los RAPG se acoplan a las proteínas G y activan de forma selectiva las vías de señalización celular mediadoras de sus efectos fisiológicos.

CAMBIOS QUE ACTIVAN EL RECEPTOR

La función principal del receptor consiste en transmitir de forma selectiva la señal recibida desde el exterior hacia el interior de la célula. Como consecuencia de esta transmisión, se modifican el metabolismo y los procesos funcionales del grupo de células en las que el receptor se ha activado. Aunque existen diversas rutas de señalización celular, que varían en función del tipo de RAPG implicado, el modelo más simple y aceptado por el que las moléculas transmisoras de la señal, o ligandos (como hormonas y neurotransmisores), activan el receptor al que se unen es la interacción directa del ligando con la región interna del receptor, que se halla rodeada por sus siete segmentos transmembranales.

Utilizando como modelo el receptor adrenérgico β_2, uno de los RAPG más estudiados, se ha demostrado que la presencia de un ligando agonista altera las interacciones entre los aminoácidos de la cerradura iónica mencionada anteriormente, lo que hace que el segmento transmembranal 6 rote alrededor de su aminoácido fenilalanina. Otro proceso involucrado en la activación del receptor es la separación entre los segmentos transmembranales 3 y 6. De este modo, en presencia de un ligando agonista, el grupo de aminoácidos aromáticos que se encuentra en el segmento transmembranal 6 lleva a cabo un cambio rotacional que altera la configuración de su aminoácido prolina. Estos dos movimientos estructurales provocan el alejamiento de las zonas citoplasmáticas pertenecientes a los segmentos transmembranales 3 y 6, lo cual libera las cavidades del receptor encargadas de reconocer de forma selectiva las proteínas de las diferentes vías de señalización intracelular. Entre estas se encuentran las proteínas G.

PROTEÍNAS G

Una de las cuestiones que permanecieron sin resolver durante varias décadas después del descubrimiento de los primeros receptores fue el mecanismo molecular a través del cual la maquinaria celular reconocía la información transferida por el receptor desde exterior hacia el interior de la célula. Ya se habían descrito numerosas vías de señalización celular, tales como la activación de fosfolipasas, la liberación de iones de calcio del retículo endoplasmático y la síntesis del adenosín monofosfato cíclico (AMPc), pero se desconocía de qué modo eran activados por los receptores. Fueron Martin Rodbell, de los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU., y Alfred Gilman, del Centro Médico

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

del Suroeste de la Universidad de Texas, quienes lo desvelaron. A mediados de la década de los setenta, describieron un nuevo tipo de proteínas, las proteínas G, que mostraban la capacidad de estimular la actividad de la enzima adenilato ciclasa, que cataliza la síntesis de AMPc. Ambos científicos recibieron el premio Nobel en 1994 por estos descubrimientos.

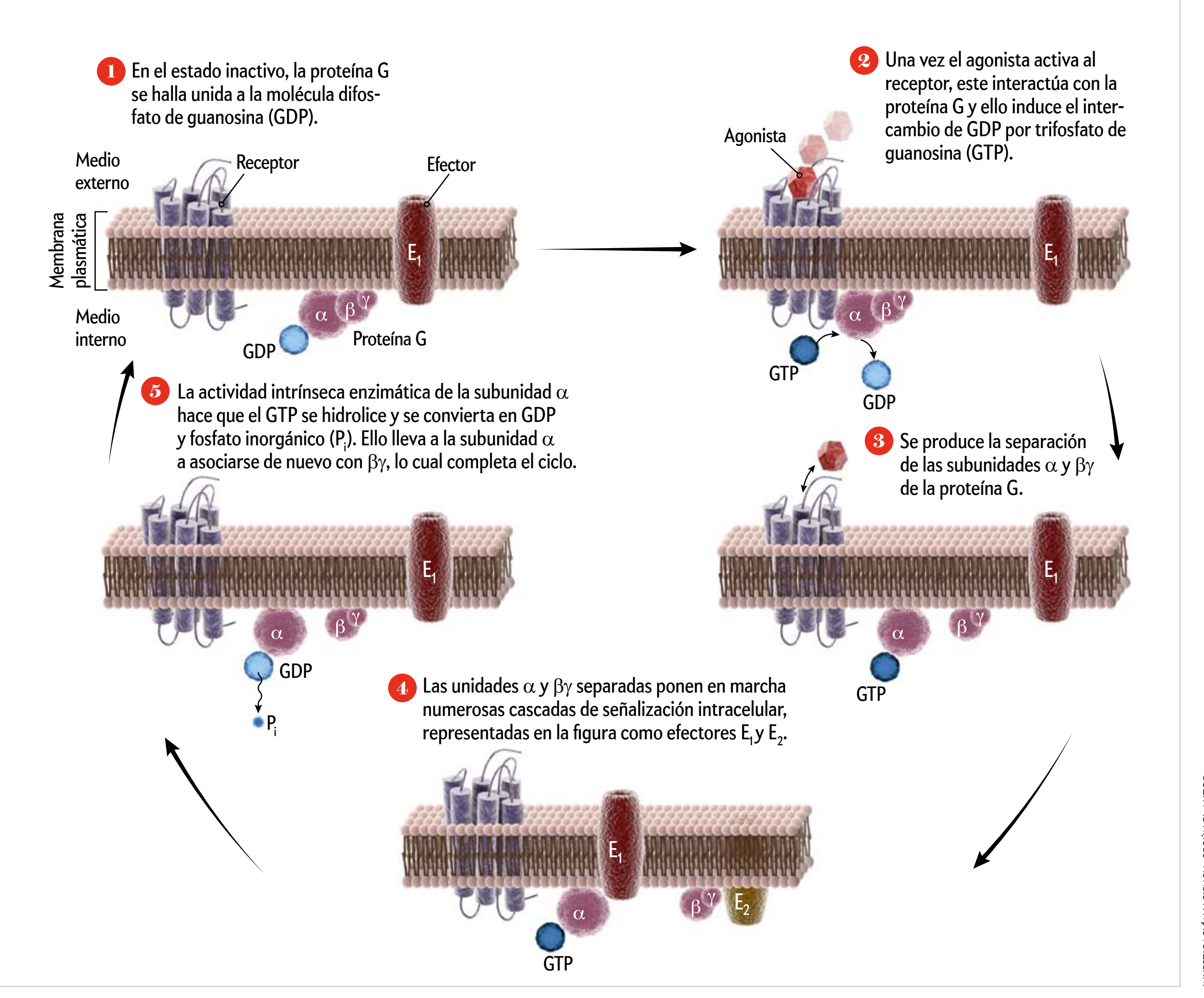
Hoy sabemos que esas proteínas, que reconocen y se unen a nucleótidos de guanina (motivo por el que se las conoce como proteínas G), son complejos proteicos heterotriméricos formados por tres subunidades: α, β y γ. Las subunidades β y γ forman un dímero estable que en condiciones fisiológicas nunca llega a disociarse. Estas proteínas G son solubles e intracelulares, y utilizan ácidos grasos liposolubles unidos covalentemente a las subunidades α y γ para mantenerse ancladas a la membrana plasmática celular.

En 2011, el grupo de investigación liderado por Brian Kobilka caracterizó la estructura proteica, a nivel atómico, del receptor adrenérgico β_2 acoplado a la proteína G_s. Sus resultados revelaron el mecanismo por el cual el receptor, en su conformación estructural activa, es capaz reconocer e interactuar molecularmente con la proteína G, y esta puede entonces modular las cadenas de señales intracelulares. Una de las principales conclusiones basadas en estos resultados hace referencia a los cambios conformacionales que llevan al receptor adrenérgico β_2 a propagar la señal recibida por el agonista hacia el lugar donde la proteína G se une a nucleótidos de guanina.

MECANISMO CELULAR

Cómo funcionan los receptores

Las células se comunican entre sí o con el entorno a través de señales (como hormonas y neurotransmisores) denominadas ligandos, o agonistas. Cuando estos llegan a la superficie externa de la célula, se unen a los receptores acoplados a las proteínas G, situados en la membrana plasmática, y provocan en ellos una serie de cambios moleculares que activan a las proteínas G, en la parte interna de la membrana. Estas, a su vez, desencadenan una cascada de reacciones que permiten a la célula acometer sus funciones.



La interacción entre el receptor y la proteína G desencadena el ciclo de activación y desactivación que permite a esta última propagar o detener la señal. En primer lugar, la proteína G libera la molécula difosfato de guanosina (GDP), el cual es sustituido por trifosfato de guanosina (GTP). Ello origina un reajuste estructural que desacopla la proteína G del receptor y separa espacialmente las subunidades α, por un lado, y $\beta\gamma$, por otro. El estado activo de α y $\beta\gamma$ persiste hasta que la actividad enzimática de α hidroliza y transforma el GTP en GDP, proceso tras el cual se puede observar de nuevo la formación del complejo proteico compuesto de α y $\beta\gamma$. En la actualidad, sabemos que tanto la subunidad α como la $\beta\gamma$ pueden afectar de forma independiente la función de distintas vías de señalización celular.

La mayor parte de los RAPG reconocen de forma bastante específica un grupo limitado de proteínas G. De este modo, basándonos en su afinidad de acoplamiento, los RAPG se dividen en tres grandes grupos: los acoplados a proteínas G_s, a proteínas G_i y a proteínas G_q. Aunque los detalles estructurales y biofísicos que confieren esta selectividad en términos de acoplamiento aún no están resueltos, los estudios han demostrado que es el segundo bucle intracelular del receptor el encargado de definir a qué tipo proteína G en particular (G_i, G_s o G_q) se va a unir el receptor una vez este adopta su conformación estructural activa. Cada una de ellas es responsable de la modulación de un tipo de vía diferente de señalización celular. Así, las proteínas G_s y G_i activan o inhiben, respectivamente, la enzima adenilato ciclasa, mientras que G_q modula las señales celulares mediadas a través del calcio (Ca^{2+}).

Una de las preguntas fundamentales que aún sigue sin aclarar hace referencia a la estequiometría del número de moléculas de proteínas G activadas por cada uno de los receptores. Asimismo, todavía se desconocen los mecanismos bioquímicos que controlan la localización de cada tipo de receptor y proteína G en la superficie celular donde deben acometer su función. Un mejor conocimiento de este y otros procesos contribuiría a establecer las bases para el desarrollo de nuevos fármacos dirigidos de modo específico a las vías de señalización celular responsables de una enfermedad en particular.

NUEVOS DESAFÍOS

Hasta hace pocos años, se pensaba que la única vía por la que los RAPG transmitían la señal al interior de la célula era a través de las proteínas G. Sin embargo, en los últimos años hemos sido testigos de numerosos avances que demuestran la existencia de mecanismos de señalización donde no intervienen las proteínas G.

Uno de esos avances hace referencia a los complejos que forman los RAPG. Aunque la mayor parte de las proteínas de membrana, por motivos de estabilidad termodinámica, se expresan y ejercen su función como dímeros (dos proteínas en contacto directo), los RAPG habían sido tradicionalmente descritos como monómeros. Si bien se ha demostrado que los RAPG funcionan sobre todo como monómeros, se ha observado que ciertos tipos de RAPG pueden formar heterodímeros. Ello supone que, en ciertas condiciones celulares, algunos tipos de RAPG se asocian en contacto directo (interacción molecular) con otros tipos de receptores. Algunos ejemplos de heterodímeros son los receptores de serotonina 5-HT_{2A} y del glutamato mGlu2, que constituyen la diana de los fármacos contra la esquizofrenia, y los receptores opioide μ y adrenérgico α_{2A}, responsables de los efectos analgésicos y adictivos inducidos por la morfina y la heroína.

Al actuar como heterodímeros, los receptores no solo modifican su perfil farmacológico, sino también el modo en que reconocen las diferentes familias de proteínas G con las que se acoplan. De esta manera, un receptor que como monómero tiene preferencia por las proteínas G_i, como heterodímero puede mostrar, en presencia del mismo ligando agonista, mayor afinidad por las proteínas G_q. Estos resultados sacan a la luz la complejidad de la estructura y la función de los RAPG, y lo mucho que aún nos falta por saber sobre los efectos de su distinta configuración en la señalización celular y, por consiguiente, sobre las opciones terapéuticas que nos permitan actuar sobre ellos.

Otro de los procesos fundamentales de la fisiología de los RAPG descubiertos en los últimos años es la «desensibilización». Esta evita que la presencia prolongada de un ligando agonista active de forma descontrolada las vías celulares que se encuentran por debajo del receptor. Uno de los primeros pasos de este proceso consiste en la fosforilación (adición de grupos fosfato) de ciertos aminoácidos de los receptores, que es llevada a cabo por unas enzimas llamadas cinasas. Así, en presencia de ligandos agonistas, la familia de proteínas conocidas como cinasas de receptores acoplados a proteínas G (GRK), reconocen la forma activa del receptor y unen covalentemente grupos fosfato a los aminoácidos serina y treonina localizados sobre todo en los bucles intracelulares del receptor activo. Estos grupos fosfato promueven la unión de cierta proteína, la arrestina (término derivado del inglés *arrest*, que significa «detener»), la cual compite físicamente con la proteína G por su lugar de unión al receptor, dando lugar al desacoplamiento del receptor y la proteína G.

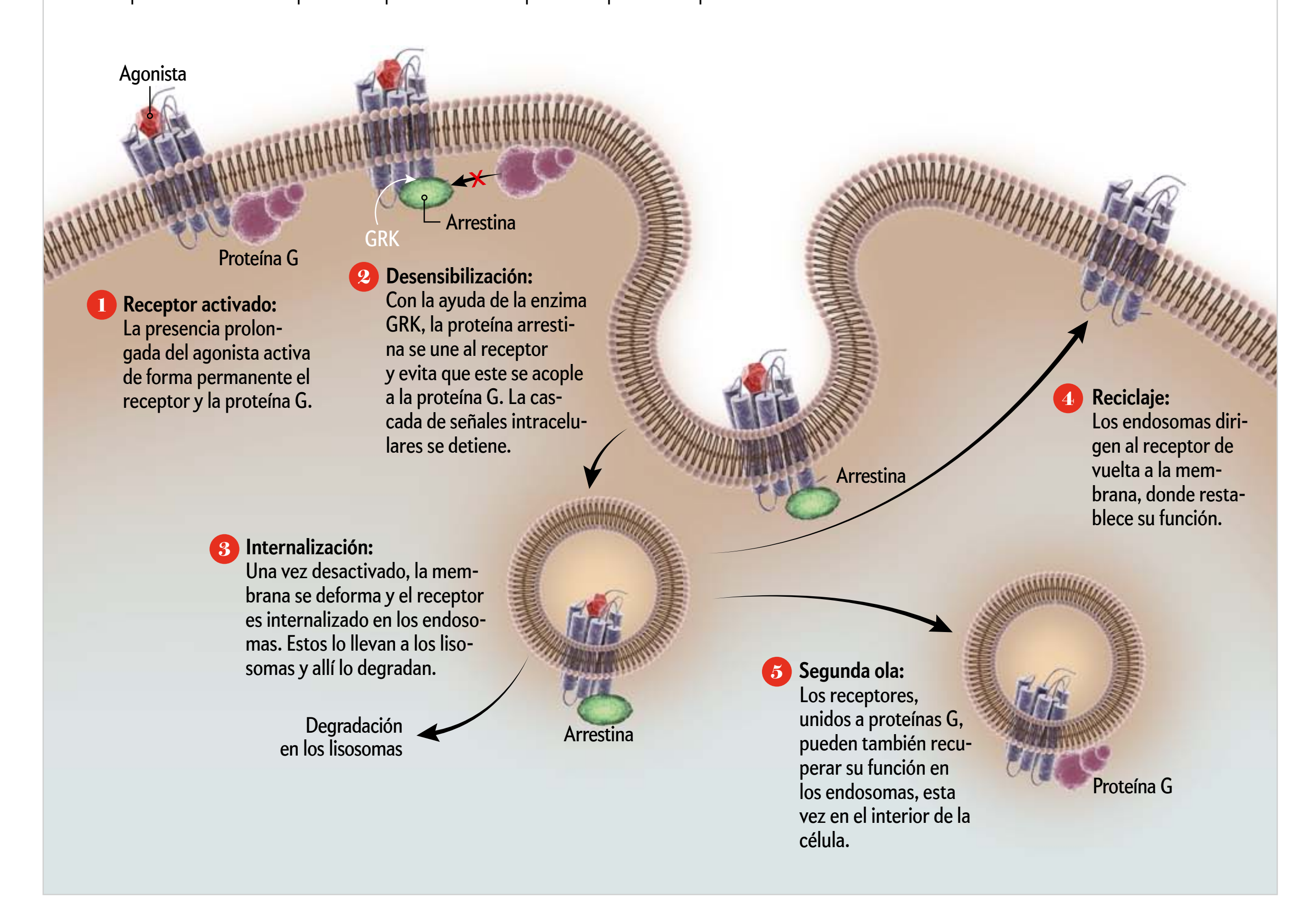
Además de encargarse de tal desacoplamiento, la unión de la arrestina al receptor también inicia el proceso por el que la membrana plasmática se deforma y arrastra al receptor hacia unas vesículas intracelulares, un mecanismo conocido como internalización. Estas vesículas, también denominadas endosomas, siguen complejas reglas de tráfico celular que dirigen al receptor, bien hacia su degradación final en el lisosoma (el orgánulo encargado de digerir los residuos celulares), o bien de vuelta a la superficie celular, donde se restablece su función.

Uno de los conceptos que estuvo aceptado durante más de dos décadas es el que proponía que la activación de las proteínas G por los RAPG estaba restringida a la membrana plasmática. Este dogma, sin embargo, está comenzando a desatar una gran controversia después de que hayan aparecido varias pruebas que demuestran la capacidad de los RAPG de inducir una «segunda ola» de señalización después de atravesar el proceso de internalización. Mediante el empleo de herramientas moleculares, el laboratorio de Mark von Zastrow, de la Universidad de California en San Francisco, reveló que puede detectarse el acoplamiento del receptor a la proteína G después de que este haya sido internalizado; y que el receptor, una vez localizado en las vesículas intracelulares, puede modificar la actividad de la enzima adenilato ciclasa durante varios minutos.

La demostración de esa segunda ola de activación hace necesario revisar la teoría farmacológica aceptada hasta ahora, según la cual el acoplamiento del receptor a la proteína G y sus efectos en las vías de señalización están restringidos a la membrana plasmática en la superficie celular. De este modo, la activación de los RAPG en los endosomas abre dos nuevos mecanismos que amplían la función de los receptores. El primero

Receptores que se degradan y se regeneran

En los últimos años se han descubierto nuevos mecanismos del funcionamiento de los receptores acoplados a proteínas G. Uno es la desensibilización, que se encarga de detener la cascada de señales intracelulares ante la presencia prolongada del agonista. En este proceso interviene la arrestina, una proteína que se une al receptor y evita el acople de la proteína G. Tras ello, el receptor sufre procesos de internalización a través de vesículas intracelulares, o endosomas, que en última instancia lo llevan a su degradación, o bien lo dirigen de vuelta a la superficie celular, donde recupera su función. Otro mecanismo descubierto es la segunda ola de acoplamiento del receptor a las proteínas G después de que el receptor ha sido internalizado en los endosomas.



está relacionado con la duración de la señal y la posibilidad de que se prolongue a través de este nuevo mecanismo. El segundo tiene que ver con la diferencia que podría surgir en la respuesta celular según la localización del receptor. La respuesta tal vez varíe según si es inducida por el receptor de la superficie celular o por el del endosoma.

Todos esos factores aumentan la tremenda variedad y complejidad de los procesos de señalización celular en los que están envueltos los RAPG. De este modo, aunque en los últimos años se han utilizado un gran número de métodos experimentales que han dado como fruto un mejor conocimiento de la estructura y función de los RAPG, aún nos quedan pendientes bastantes preguntas por contestar. Estos avances no solo fortalecen nuestro conocimiento de los principios básicos de la actividad celular, sino que, en el campo de la medicina molecular, contribuyen también de forma notable al desarrollo de nuevos fármacos más específicos y con menos efectos secundarios no deseados.

PARA SABER MÁS

The structure and function of G protein-coupled receptors. D. M. Rosenbaum, S. G. Rasmussen y B. K. Kobilka en *Nature*, vol. 459, págs. 356-363, 2009.

Hormone signaling via G protein-coupled receptors. J. González Maeso y S. C. Sealfon en *Endocrinology* (6.ª edición). Elsevier, 2010.

Restructuring G protein-coupled receptor activation. M. Audet y M. Bouvier en *Cell*, vol. 151, págs. 14-23, 2012.

From atomic structures to neuronal functions of G protein-coupled receptors. K. Palczewski y T. Orban en *Annual Review of Neuroscience*, vol. 36, págs. 139-164, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

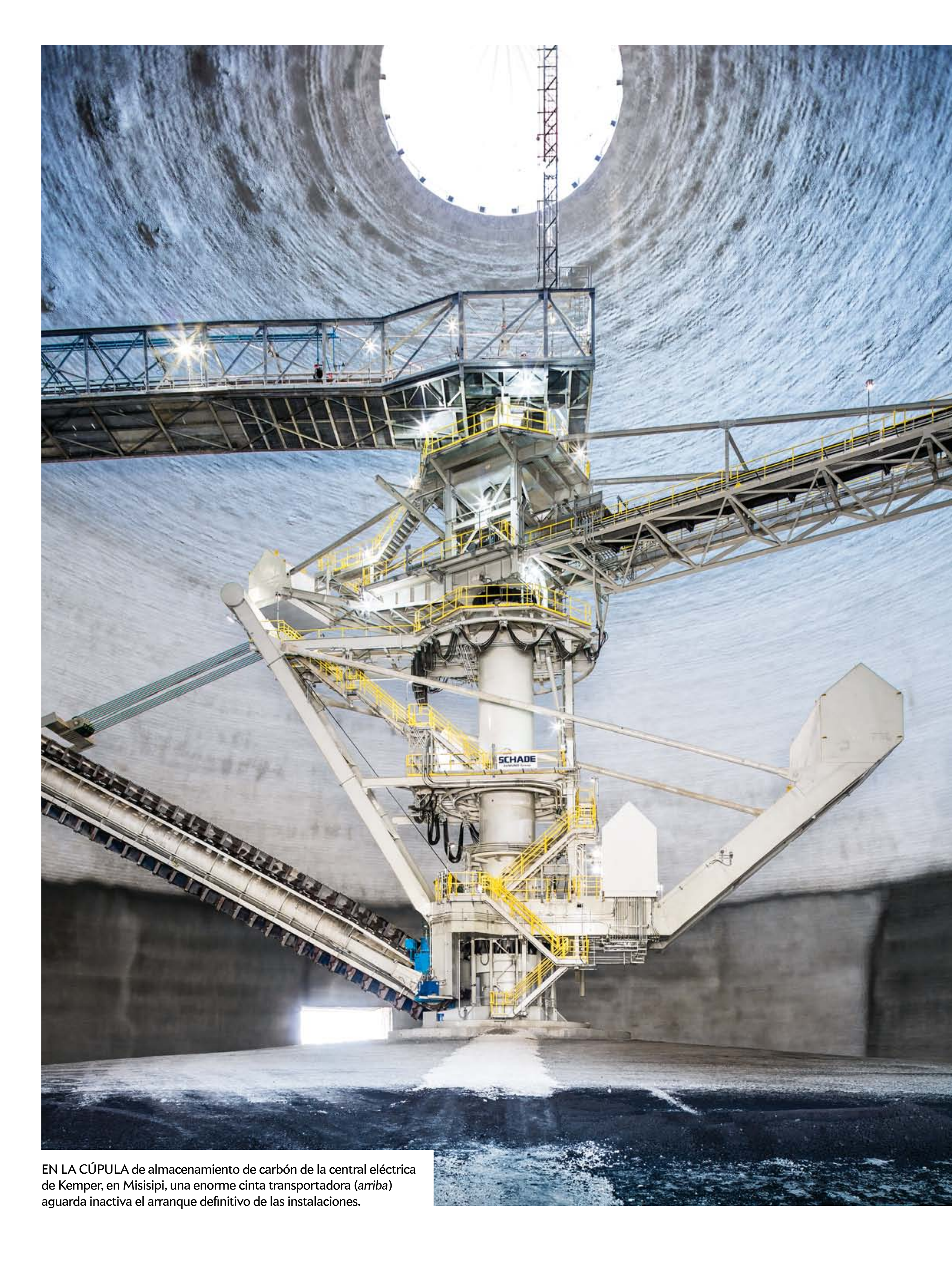
Proteínas G. Maurine E. Linder y Alfred G. Gilman en *IyC*, septiembre de 1992.

Comunicación intercelular. Proteínas G. Juan Carlos Lacal en *IyC*, abril de 1995.

Nuevas dianas farmacológicas. Terry Kenakin en *IyC*, diciembre de 2005.

Fármacos alostéricos. Melinda Wenner en *IyC*, marzo de 2010.

Bases bioquímicas de la esquizofrenia. José L. Moreno, Miguel Fribourg y Javier González Maeso en *MyC*, n.º 44, 2010.



EN LA CÚPULA de almacenamiento de carbón de la central eléctrica de Kemper, en Misisipi, una enorme cinta transportadora (*arriba*) aguarda inactiva el arranque definitivo de las instalaciones.

ENERGÍA

La *falacia* de la captura de carbono



Todo plan creíble de mitigación del calentamiento global depende de que la captura de carbono desempeñe un papel importante. No parece que vaya a ser así

David Biello



David Biello es redactor de *Scientific American*.



Tim Pinkston ha construido un gigantesco juego de química en un bosque de pinos al este de Misisipi. «Estoy muy satisfecho de ver que ya se está convirtiendo en realidad», dice este ingeniero durante un recorrido en una cálida mañana de verano por la central energética del condado de Kemper.

Sobre un amplio terreno llano, talado y pavimentado con hormigón, Pinkston señala un enorme complejo de cientos de kilómetros de sinuosos conductos que se levanta hacia el cielo. En el centro de este híbrido entre planta química y central eléctrica destacan dos impresionantes silos de más de 90 metros de altura. La pareja de gasificadores, cada uno de los cuales pesa 2300 toneladas, puede generar el calor y la presión de un volcán, como se requiere para que el lignito, un tipo de carbón marrón y húmedo que se extrae casi de debajo de los pies mismos de Pinkston, se convierta en un combustible gaseoso listo para ser quemado a fin de generar electricidad.

Lo extraordinario de este juego de química no es el combustible que enseguida producirá, sino el tratamiento del principal producto secundario: el dióxido de carbono, el gas de efecto invernadero causante del calentamiento global. En lugar de expulsar el CO_2 a la atmósfera a través de una chimenea, como hacen las centrales eléctricas de carbón al uso, Pinkston y sus colaboradores en Kemper lo capturarán.

La de Kemper es la central de carbón más avanzada de Estados Unidos. Además, resulta clave para el empeño mundial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, una meta ansiada desde hace mucho y a la que se han adherido la mayor parte de los más de 190 países que mantuvieron negociaciones climáticas en París el pasado mes de diciembre. Las centrales eléctricas de carbón constituyen la mayor fuente de emisiones de CO_2 del planeta, ya que los países más contaminantes dependen de ellas para generar una buena parte de su electricidad. Pocas de estas naciones estarán dispuestas a abandonar la quema de carbón (tampoco Estados Unidos, que obtiene de este combustible el 40 por ciento de su energía eléctrica), por lo que la única vía para cumplir sus compromisos sin cerrar las centrales es impedir que el CO_2 llegue a la atmósfera. Para ello, tendrán que atraparlo.

No existe ningún plan creíble para combatir el calentamiento global —sea una propuesta de países individuales, sea del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático— que no incorpore la captura y almacenamiento de carbono (CAC). Incluso en el caso hipotético de una dependencia mucho mayor de la energía nuclear o de las renovables, todavía se requeriría la CAC para limpiar las emisiones derivadas de la producción de todo el cemento y el acero necesarios. Solo en Norteamérica hay más de 6000 grandes fuentes industriales de CO_2. Unas 1000 son hornos o fábricas de cemento que emiten, cada una, 100.000 toneladas o más de CO_2 al año. Casi 5000 son centrales eléctricas que queman combustibles fósiles y que emiten aún más. Si añadimos los miles de centrales de combustibles fósiles de China, la India y otros países, el porcentaje total supera el 70 por ciento de la contaminación por CO_2 del planeta. Con tales cifras, no es difícil entender por qué la CAC resulta fundamental para reducir las emisiones.

El problema reside en que la captura de carbono es una solución costosa. La técnica en sí parece funcionar, pero la construc-

EN SÍNTESIS

En Kemper, Misisipi, la compañía Mississippi Power está construyendo una central eléctrica de «carbón limpio» que producirá electricidad a partir del tipo de carbón más sucio y capturará sus emisiones de CO_2 en lugar de enviarlas a la atmósfera.

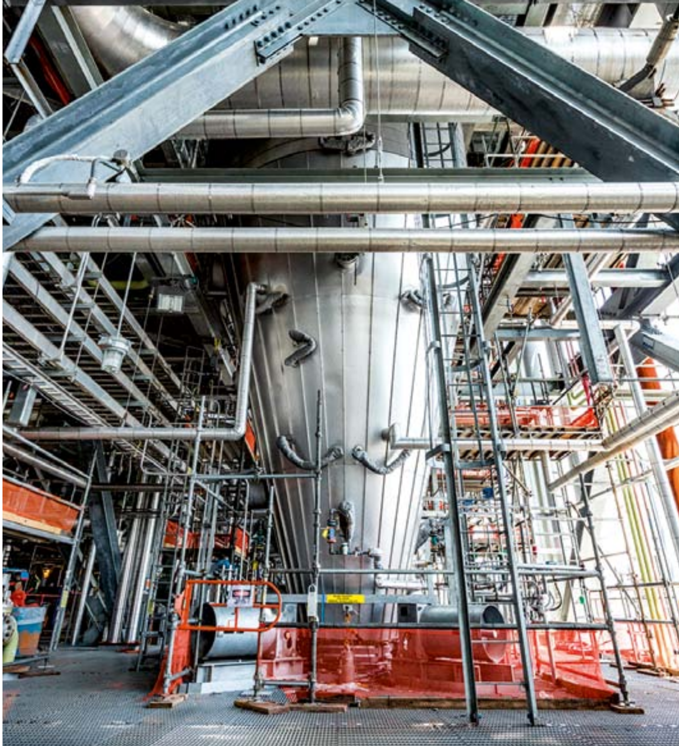
Para almacenar ese CO_2, la central lo venderá a una compañía que lo inyectará en yacimientos petrolíferos menguantes para obtener más crudo. Se estima que cerca de un tercio de las emisiones de CO_2 permanecerán atrapadas bajo tierra. Sin embargo, la combustión del petróleo extraído generará nuevas emisiones.

Los elevados costes de esta y otras instalaciones similares cuestionan que el planteamiento sea económicamente sostenible. Hasta la fecha se han cerrado o abandonado 33 proyectos de captura y almacenamiento de carbono en todo el planeta.

A falta de una captura de carbono efectiva y asequible, las naciones que el pasado mes de diciembre se comprometieron en París a reducir sus emisiones no podrán cumplir sus promesas.

JEFF WILSON (*fotografías*)





KEMPER ha necesitado 277 kilómetros de sinuosos conductos, 36.000 toneladas de acero y dos gasificadores gigantes (*arriba, uno de ellos*) para convertir el carbón en un gas de combustión más limpio e impedir que el CO_2 producido se incorpore a la atmósfera.

ción y funcionamiento de una central a gran escala presenta un coste muy elevado, como va viéndose a medida que el proyecto de Kemper se acerca a estar terminado y otras centrales más pequeñas adquieren experiencia. Y luego está la dificultad de qué hacer con el carbono una vez capturado. Su almacenamiento en formaciones geológicas profundas que puedan retenerlo durante miles de años encarece todavía más el proceso, y los Gobiernos se muestran reacios a pagar las facturas. Para recuperar la inversión, las compañías propietarias de las centrales se verían obligadas a aumentar las tarifas eléctricas a sus clientes muy por encima de los precios actuales.

El coste de la CAC ha frustrado esfuerzos inicialmente prometedores. En un proyecto piloto de la central de carbón Mountaineer, en Virginia Occidental, se enterraron más de un millón de toneladas de CO_2, pero más tarde las instalaciones cerraron por falta de financiación para continuar con el experimento. En 2015, el Departamento de Energía de EE.UU. canceló su emblemática iniciativa FutureGen, emprendida en asociación con las industrias del sector y que consistía en reconstruir una vieja central de carbón de Illinois, después de haber gastado 1650 millones de dólares. China le ha cambiado discretamente el nombre a GreenGen, su proyecto insignia de CAC, similar al de Kemper, y ahora la central opera sin capturar el CO_2. Actualmente solo funcionan 15 proyectos de CAC en todo el planeta y otros 7 se encuentran en construcción; entre ellos, el de Kemper. Los estudios previos, el diseño y la construcción de cada uno han costado miles de millones de dólares.

Con todo, el proyecto de Kemper ha hallado un modo creativo de financiarse: costear la CAC separando y vendiendo el CO_2, una estrategia conocida como «captura y uso de carbono». Las empresas podrían aprovechar el CO_2 como ingrediente en la producción de bicarbonato sódico, pladur, plásticos o combustibles. Pero las emisiones procedentes de todas las centrales eléctricas del planeta dejan pequeña incluso la cantidad de materia prima que requieren los alrededor de 4000 millones de toneladas de cemento que se fabrican al año, uno de los principales productos para los que podría aprovecharse el gas. «Dada la cantidad de CO_2 a la que debemos hacer frente, es imposible que podamos convertirlo todo en un artículo valioso», afirma Ah-Hyung (Alissa) Park, ingeniera química de la Universidad de Columbia que investiga el problema.

Hay un cliente que podría aprovechar un gran volumen de CO_2 y que cuenta con la solvencia suficiente para adquirirlo: las grandes compañías petrolíferas. Estas empresas necesitan ingentes cantidades de CO_2 para inyectarlas en el suelo y forzar así el ascenso del petróleo por unos pozos que, de otro modo, se estarían quedando secos. La captura y uso de carbono plantea, pues, una contradicción: ¿tiene sentido actuar ante el cambio climático capturando carbono, para emplearlo después en extraer más combustibles fósiles que quemar?

EL LABERINTO

El proyecto de Kemper se inició en 2006, tras el huracán Katrina, cuyas secuelas contribuyeron al aumento de los precios del gas natural. La compañía eléctrica Mississippi Power se encaminaba hacia un futuro en el que generaría el 80 por ciento de su electricidad a partir de gas natural, según su portavoz, Lee Youngblood. La energía nuclear resultaba demasiado cara, y las renovables, como la eólica y la solar, demasiado intermitentes. Así que solo quedaba el lignito local. Los campos vecinos albergan más de 600 millones de toneladas de este tipo de carbón, el más sucio y húmedo de todos. Una cantidad suficiente para que una central como la de Kemper se mantenga en funcionamiento durante 50 años.

Las centrales de carbón al uso suelen evitar el lignito, ya que limpiar la contaminación atmosférica que genera, por no hablar del CO_2, es desalentador. Pinkston y sus colaboradores comprendieron que la construcción de una central eléctrica alrededor de dos grandes gasificadores les permitiría usar el lignito y, aun así, mantener la contaminación por debajo de los límites federales.

También se dieron cuenta de que incorporando más equipamientos podrían capturar el CO_2, una idea que estratégicamente tenía sentido cuando se concibieron los planes, dado que el Congreso estadounidense estaba pensando seriamente en promulgar una legislación para limitar la contaminación procedente de los gases de efecto invernadero. En 2009, el estado de Misisipi dio permiso a Mississippi Power para construir la central de Kemper, con un coste máximo de 2880 millones de dólares.

Southern Company, la matriz de Mississippi Power, ya había desarrollado el gasificador en la década de los noventa como parte de una serie de experimentos encaminados a convertir el lignito en un combustible más limpio. El equipo de Pinkston escogió un disolvente industrial, Selexol, para separar el CO_2 de los gases generados al presurizar y calentar el carbón. Si después se disminuía la presión, el CO_2 se separaría con facilidad del disolvente, como cuando se abre un sifón de agua carbonatada. Ese planteamiento implicaba destinar una menor cantidad de la energía generada por la quema de carbón para limpiar la contaminación, lo que reduciría los costes. Además, parecía que se podría lograr utilizando una serie de elementos tecnológicos que durante años habían tenido otros usos. «Nada es nuevo aquí, excepto la integración», comenta Bruce Harrington, subdirector de la planta de Kemper.

Pero la integración ha resultado ser más difícil de lo previsto. Por unas piezas defectuosas, hubo que demoler y volver a construir la sección de la central dedicada a secar el carbón. A medida que se construía la central, su laberinto de tuberías creció gradualmente hasta alcanzar 277 kilómetros, 122 más de lo planeado. En el interior de la gigantesca maraña se pintó parte de la maquinaria de un azul especial que cambiaba de color si se calentaba o se enfriaba. Aunque se habían colocado instrumentos en más de 30.000 puntos, esa pintura era una de las pocas formas de ver en el interior del laberinto y asegurarse de su buen funcionamiento. Por otro lado, fue necesario importar ingenieros especializados en petroquímica e instalar más de 3700 kilómetros de cable eléctrico, lo que supuso doblar la mano de obra.

Capturar carbono obliga a construir centrales grandes y caras, al igual que ocurre con la energía nuclear. Esa situación ha forzado el abandono de una larga lista de proyectos

Tanta complejidad disparó los gastos. En octubre de 2015, el proyecto de Kemper tenía un sobrecoste de 3900 millones de dólares: los 2400 millones presupuestados en 2009 se habían convertido en 6300. Los retrasos en el montaje han obligado a aplazar la apertura desde mayo de 2014 hasta, como mínimo, abril de 2016; cada mes de retraso cuesta al menos 25 millones de dólares, según los datos que Southern Company ha presentado ante la Comisión del Mercado de Valores de Estados Unidos. La compañía tuvo que devolver cientos de millones de dólares en créditos fiscales federales, condicionados a unos plazos de conclusión de distintas fases del proyecto que no se habían cumplido.

Mississippi Power se ha visto obligada a recurrir a sus propios clientes para no caer en la quiebra conforme construye una central eléctrica cuyo valor supera al de la totalidad de sus demás activos. En agosto subió la tarifa eléctrica un 18 por ciento. La gran solución, sin embargo, consiste en vender CO_2 puro y seco al sector petrolero.

PETRÓLEO AL RESCATE

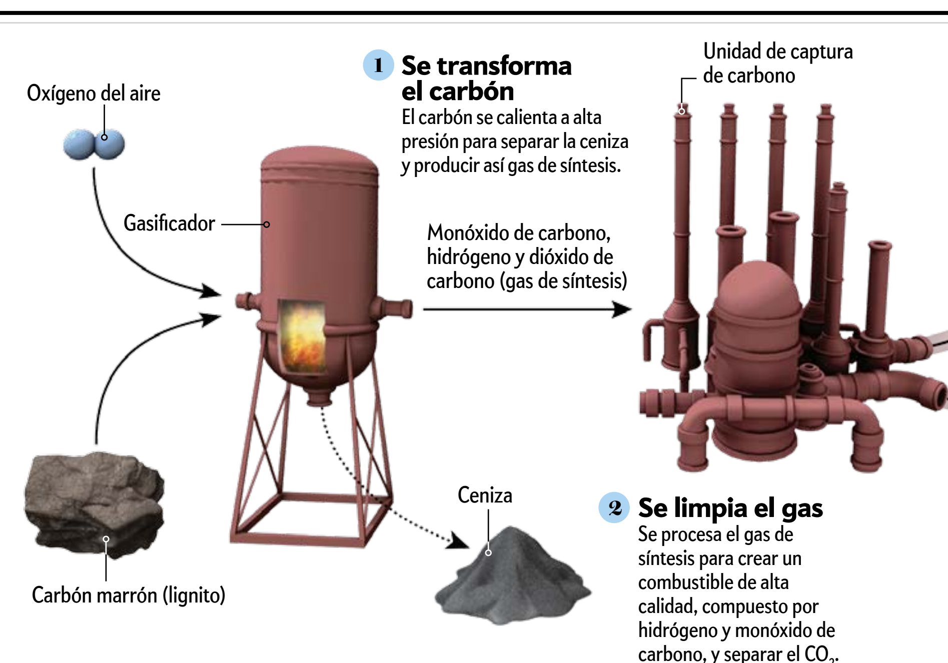
Las compañías petroleras llevan décadas empleando CO_2 para arrancarle más crudo al subsuelo. Para ello compran el gas a otras compañías, que han terminado explotando yacimientos subterráneos de CO_2 en vez de las reservas de petróleo o gas natural que buscaban originalmente. Construyen encima del

JOSÉ MIGUEL MAYO *(ilustraciones)*

ASÍ FUNCIONA

Captura de carbono

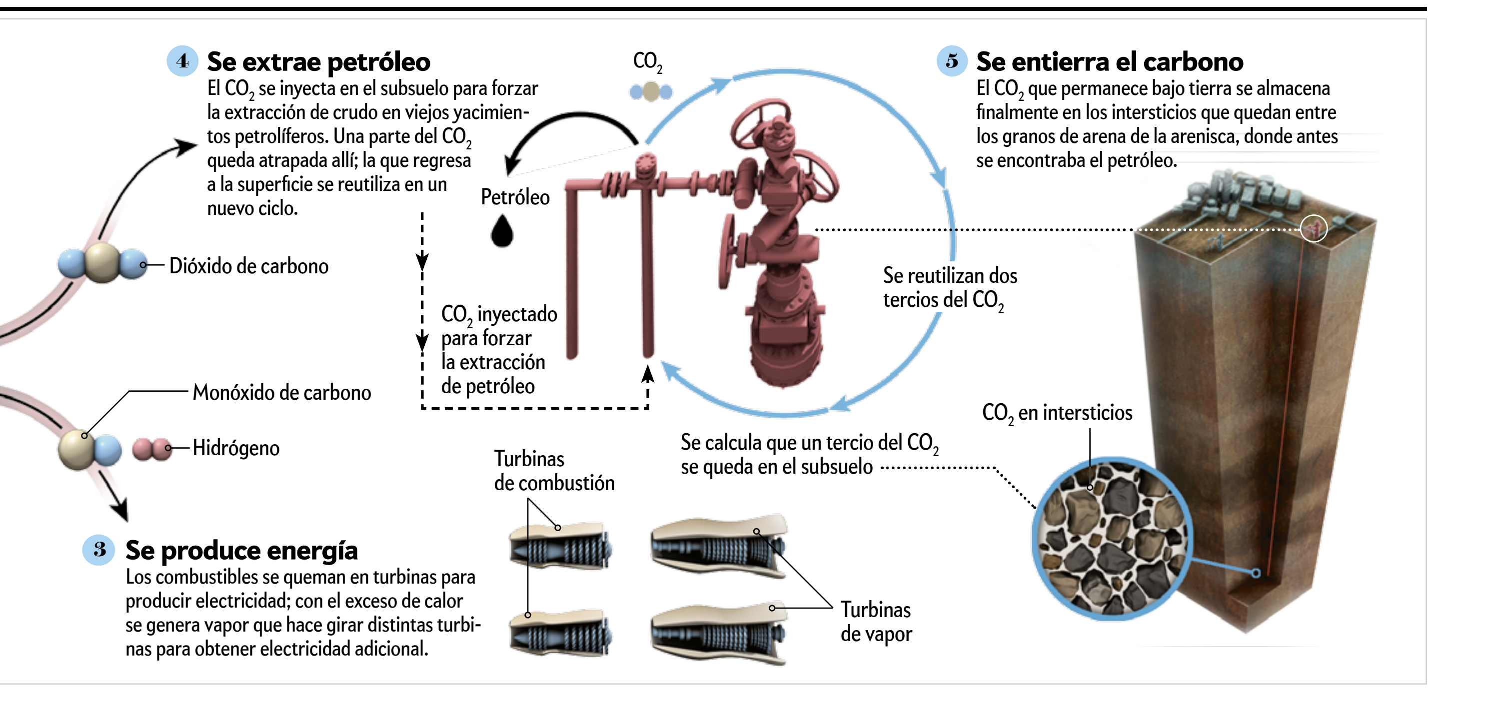
La central eléctrica de Kemper combina de forma innovadora una serie de técnicas preexistentes. El proceso empieza con lignito, el tipo de carbón más sucio. Este se convierte en un gas (*1*) más limpio de quemar (*2*) para producir electricidad (*3*). El proceso deja como residuo CO_2, el cual puede capturarse en lugar de ser expulsado a la atmósfera a través de una chimenea. A continuación, ese CO_2 se utiliza para extraer crudo de viejos yacimientos petrolíferos improductivos (*4*). Una parte del CO_2 quedará atrapado en el subsuelo (*5*), de forma que no alcanzará la atmósfera y, por tanto, no contribuirá al calentamiento global. En todo el mundo se han construido varias centrales similares a la de Kemper, pero sus costes están resultando exorbitados. Muchas de ellas han cerrado o no han llegado a entrar en funcionamiento debido a retrasos en la construcción y a los sobrecostes.



A LA ESPERA: Aparcada en la tierra que quedó expuesta tras talar el bosque, la draga de minería horizontal Liberty Belle, de 19.000 caballos de potencia, aguarda a limpiar una nueva zanja para extraer carbón de lignito (*derecha*).

campo petrolífero una especie de minifábrica que comprime el CO_2 y lo inyecta en el subsuelo. El CO_2 se mezcla con el petróleo, lo que facilita su flujo y restablece la presión subterránea para forzar su ascenso en mayor cantidad hasta la superficie. Dos tercios del CO_2 que se inyecta regresan con el combustible; después, ese gas se combina con nuevos suministros para enviarlo de vuelta al subsuelo y recuperar todavía más crudo. En cada ciclo, cerca de un tercio del CO_2 se queda enterrado, atrapado en los poros de la arenisca donde antes se encontraba el petróleo. Ese es el beneficio climático: enterrar un gas de efecto invernadero y lograr así que no pase a la atmósfera.

Desde su descubrimiento en 1939, el yacimiento petrolífero de Tinsley, cerca de Kemper, ha producido más de 220 millones de barriles de crudo. Un campo tan grande puede justificar el elevado coste que supone la compra de CO_2 a centrales como la de Kemper —a lo que hay que añadir las nuevas carreteras, los viajes de camiones y los gasoductos de CO_2— con el fin de extraer 100 millones de barriles más. En marzo de 2008, la compañía Denbury Resources empezó a inundar el yacimiento con CO_2 procedente de depósitos naturales. Hoy recicla en Tinsley 19 millones de metros cúbicos de CO_2 anuales y compra cada año 2,8 millones de metros cúbicos más, lo que ha impulsado la producción de petróleo desde 50 hasta más de 5000 barriles diarios. Cuando se encuentre completamente operativa, la central de Kemper planea transportar unos 1700 millones de metros cúbicos de CO_2 al año mediante un nuevo gasoducto de unos



100 kilómetros de extensión hasta Tinsley y otros yacimientos de la zona.

Por supuesto, la pega está en que, al quemar el nuevo petróleo como gasolina o combustible para calefacciones domésticas u otros usos, se emite más CO_2 a la atmósfera. La idea de que la lucha contra el cambio climático depende de una técnica que emplea CO_2 para obtener más petróleo, cuya combustión genera más CO_2, despierta infaliblemente una risa contenida en quienes trabajan en los campos petrolíferos.

Estados Unidos produce unos 300.000 barriles de petróleo al día mediante la inyección de CO_2 en unos 140 yacimientos, cifra que se espera que se doble si los bajos precios del petróleo suben de nuevo. Según las estimaciones del Departamento de Energía estadounidense, con el CO_2 se podrían recuperar 72 millones de barriles de crudo en todo el país, incluido Alaska. Ya existe una red de 8000 kilómetros de conducciones que transportan CO_2 desde depósitos naturales, como el domo de Jackson, en Misisipi, hasta viejos campos de petróleo, como si se tratase de una telaraña subterránea que, de vez en cuando, aflora en la superficie con una válvula o una bomba.

UNA PROPUESTA CARA

Sacar el CO_2 de los depósitos naturales cuesta alrededor de 0,5 dólares por tonelada. Sin embargo, el dióxido de carbono procedente de las complejas instalaciones de Kemper costaría hasta tres veces más.

Desde diversas partes nos llegan lecciones sobre los costes. Un caso particularmente ilustrativo es el de uno de los primeros proyectos de CAC, en la central eléctrica de Boundary Dam, de la provincia canadiense de Saskatchewan. Esta central de «carbón limpio» comenzó a abastecer a la red eléctrica en octubre de 2014. La compañía SaskPower gastó algo más de 1000 millones de dólares para remodelar uno de sus tres generadores de vapor alimentados con carbón; la finalidad era capturar sus emisiones de CO_2. El coste ascendió a unos 11.000 dólares por kilovatio de capacidad productora de electricidad, un valor tres veces superior al de un generador de vapor típico. La estimación de Mississippi Power para el proyecto de Kemper no se aleja demasiado: como mínimo, 10.000 dólares por kilovatio.

Con costes así, la captura de CO_2 implicaría un aumento de al menos 0,04 dólares por kilovatio hora en el precio de la electricidad pagado por el consumidor, según los cálculos del Departamento de Energía de Estados Unidos, lo que supondría un incremento del 33 por ciento sobre el precio medio de la electricidad en Estados Unidos, que es de 0,12 dólares por kilovatio hora. A falta de una norma que exija la captura de carbono o de un impuesto sobre las emisiones que las compañías eléctricas querrían evitar, estas no ven grandes razones económicas para apostar por la CAC. Las cuentas no salen mejor en China, donde actualmente se consume unas cuatro veces más carbón que en Estados Unidos, o en la India, cuya declaración de propósitos remitida a la cumbre del clima de París incluía la intención de construir un buen número de nuevas centrales de carbón. Vistos los costes, no parece muy probable que tales centrales cuenten con tecnología de CAC.

Aunque se redujese el coste de la captura de carbono, el de su almacenamiento quizá siga siendo demasiado elevado. Muchas de las más de 600 centrales de carbón de Estados Unidos no se encuentran en absoluto cerca de ninguna formación geológica capaz de retener de forma segura un CO_2 que, simplemente, es inyectado bajo tierra para almacenarlo de forma permanente. Y muchas de las centrales eléctricas tampoco están cerca de los 1600 yacimientos de petróleo de Estados Unidos que podrían beneficiarse de la inyección de CO_2, así que se requeriría la construcción de largos y caros gasoductos y de estaciones de compresión. Por otra parte, los científicos no pueden asegurar con certeza en qué medida beneficiaría al clima el uso de CO_2 para obtener petróleo. «Desconocemos la cantidad neta almacenada de CO_2», afirma Camille Petit, ingeniera química del Colegio Imperial de Londres.

SALDO DE CUENTAS APLAZADO

El ejemplo de Kemper demuestra que capturar carbono obliga a construir centrales grandes y caras, al igual que ocurre con la energía nuclear. Esa situación ha forzado el abandono de una larga lista de proyectos, como FutureGen. Según el Instituto Global de Captura y Almacenamiento de Carbono, desde 2010 se han desechado en el mundo 33 proyectos de CAC. La mayoría de ellos consumió cientos de millones de dólares antes de fracasar, y los que todavía existen, como el Proyecto de Energía Limpia de Texas, de la compañía Summit Power, luchan por subsistir. La central de Boundary Dam tiene dificultades para cumplir sus propios objetivos de captura de carbono.

No obstante, aún hay proyectos de CAC que siguen adelante por la apremiante necesidad de combatir el cambio climático. NRG Carbon 360 construye en Texas uno llamado Petra Nova. Esta compañía eléctrica planea ganar dinero con la venta de electricidad y con el petróleo extraído mediante la inyección de 1,45 millones de toneladas de CO_2 al año en el yacimiento petrolífero de West Ranch, cerca de Houston. El proyecto Petra Nova, que se prevé que entre en funcionamiento como pronto a finales de 2016, capturará el CO_2 correspondiente a tan solo el 10 por ciento de la capacidad total de la central, con un coste, sin embargo, de 1000 millones de dólares.

«Limpiar las emisiones de las centrales de carbón es un buen objetivo», afirma Al Armendariz, activista del Sierra Club y exmiembro de la Agencia de Protección Ambiental estadounidense. «Pero los costes del proyecto Petra Nova, especialmente si se comparan con lo bajos que son en Texas los de las energías renovables, como la eólica y la solar, ponen en entredicho que la CAC sea la vía más eficaz para reducir las emisiones de carbono.»

Ahí reside la falacia. A menos que EE.UU. comience a cerrar más centrales de carbón e incluso plantas de gas natural, deberá encontrar la manera de que la CAC deje de ser un caro lujo y se convierta en una solución viable. De lo contrario, el país no alcanzará su objetivo a largo plazo de reducir un 80 por ciento las emisiones de gases de efecto invernadero para 2050.

La central de Kemper no brinda excesivas esperanzas de que la captura de carbono pueda convertirse en una solución



LA CAPTURA DEL CO_2 y otros agentes contaminantes de la central de Kemper ha requerido la construcción de un extenso laberinto de conductos y torres, como se aprecia en la imagen. En el extremo izquierdo pueden verse los altos gasificadores que generan las emisiones; las turbinas productoras de electricidad (*no mostradas*) se sitúan a la derecha del conjunto.

fácil y barata. Junto al gran coloso sobresalen dos almacenamientos de carbón oscuro que se tuestan bajo el sol de Misisipi a la espera de que se enciendan los gasificadores. La máquina exclusivamente eléctrica que lo sacó, una draga de 4000 toneladas para la extracción horizontal a cielo abierto, rebautizada como Liberty Belle tras su importación desde el Reino Unido, se encuentra inactiva. También están paralizados los grandes camiones Caterpillar 789D que transportan el carbón y queman 105 litros de diésel a la hora, una fuente de CO_2 que no parece que se vaya a capturar en un futuro próximo.

Cuando finalmente la central de Kemper funcione tal y como está diseñada, capturará el 65 por ciento del CO_2, un volumen que de otra manera se emitiría a la atmósfera. No se trata de carbón limpio, sino simplemente de carbón del siglo xxi, más limpio que sus predecesores. La avanzada central expulsará formaldehído, tolueno y una larga lista de metales pesados, además de toneladas de dióxido de azufre, causante de lluvia ácida, óxidos de nitrógeno, que generan esmog, y hollín y otras partículas, entre otras formas de contaminación del aire. Además emitirá unas 83.000 toneladas anuales de gases de efecto invernadero distintos al CO_2. Por otro lado, también habría que hacer frente de alguna manera al polvo tóxico de carbón. Al final, la central de Kemper enviará al menos 360 kilos de CO_2 a la atmósfera por cada megavatio hora de electricidad que genere, una emisión muy similar a la de una central eléctrica de gas natural, aunque menos de la mitad de lo expulsado por una central de carbón ordinaria.

El mundo se encuentra en el umbral de actuar finalmente para resolver otro de los numerosos problemas de residuos a los que ha tenido que enfrentarse. Así como nuestros antepasados comenzaron a pagar para llevar la basura hasta un vertedero o tratar las aguas residuales, nosotros tendremos que pagar para minimizar el uso de la atmósfera como basurero. La central de Kemper representa lo mejor que se haya hecho hasta la fecha para limpiar el carbón, pero quizá no sea suficiente. «Nos gustaría estar dando pasos más grandes y más rápidos», afirma Julio Friedmann, subsecretario adjunto de energía fósil del Departamento de Energía de Estados Unidos.

La severa matemática económica demuestra que la CAC es mucho más cara que la mera quema del carbón. Los elevados costes podrán imposibilitar el desarrollo de una tecnología necesaria en un mundo que no le pone un precio a ese tipo de contaminación.

Para poder generar los ingresos necesarios, la central de Kemper lleva más de un año produciendo electricidad sin los gasificadores de Pinkston. Las turbinas queman gas natural que procede de un gasoducto conectado a un yacimiento bajo tierra. El CO_2 residual no se captura: sale simplemente por la chimenea, alimenta la creciente e invisible capa ya existente en la atmósfera y retiene todavía más calor, un calor que el estado de Misisipi —y el resto del planeta— no necesita. IyC

PARA SABER MÁS

Carbon storage atlas. Primera edición. Departamento de Energía de Estados Unidos, 2015. **www.netl.doe.gov/research/coal/carbon-storage/atlasv**

The global status of CCS: 2015 summary report. Instituto Global de Captura y Almacenamiento de Carbono, 2015. **http://status.globalccsinstitute.com**

EN NUESTRO ARCHIVO

Almacenamiento del dióxido de carbono bajo tierra. Robert H. Socolow en *IyC*, septiembre de 2005.

Una solución integral al carbono. Steven L. Bryant en *IyC*, enero de 2014.

BOTÁNICA

LA MEMORIA MINERAL DE LAS PLANTAS

Los fitolitos, minerales microscópicos presentes en los tejidos vegetales, se prestan a una amplia variedad de usos, desde la arqueología hasta la medicina forense

Thomas C. Hart

El viaje de Charles Darwin a bordo del *Beagle* supone un gran hito en la historia de la ciencia, pero una de sus notables observaciones apenas es conocida. Antes de vislumbrar los pinzones que llevarían su nombre y que sirvieron como inspiración para la teoría de la selección natural, Darwin fue uno de los primeros científicos en reparar en la singularidad de ciertos corpúsculos microscópicos de sílice que llamó *fitolitos*. El 16 de enero de 1832, el *Beagle* hizo la primera escala de su periplo en Porto Praya, en el archipiélago de Cabo Verde. Darwin, el naturalista incansable, anotó maravillado en su diario el siguiente pasaje, publicado después en *Diario del viaje de un naturalista alrededor del mundo* (extracto de la obra publicada por Editorial Espasa Libros, 2003):

> «Generalmente la atmósfera es brumosa, lo cual procede de un polvo impalpable en suspensión. Más tarde echamos de ver que ese polvo había averiado ligeramente los instrumentos astronómicos. La mañana antes de anclar en Porto Praya recogí un paquetito de este polvo fino, de color pardo, que parecía haber sido tamizado por la gasa de la veleta del palo mayor. Mister Lyell me ha dado también cuatro paquetes de polvo caído en un navío a unos cuantos centenares de millas al norte de estas islas. El profesor Ehrenberg halla que el mencionado polvo se compone en gran parte de infusorios con caparazones silíceos y del tejido silíceo de plantas. En cinco paquetitos que le envié ha comprobado la existencia de hasta ¡sesenta y siete formas orgánicas diferentes!»

Según su testimonio, este polvo era un fenómeno frecuente en la región y generaba una bruma tan densa que se decía que algunos navíos habían acabado embarrancando por culpa de la mala visibilidad. Los citados «caparazones silíceos» y «tejidos silíceos de plantas» eran fitolitos, moldes de sílice inorgánico procedentes de células y tejidos vegetales. El vocablo deriva del griego (*phyto*, planta, y *lithos*, piedra). Otros nombres acuñados en el pasado son sílice opalino, ópalo vegetal y fitolito de ópalo, pero el más conocido es fitolito.

La producción de fitolitos está sometida a control genético y comienza cuando las raíces de la planta absorben ácido monosilícico ($Si(OH)_4$) junto con el agua. En el proceso de transpiración, las plantas bombean agua y minerales desde las raíces al resto del vegetal, que deposita el ácido monosilícico por el camino. Algunas plantas también separan activamente el agua y depositan el ácido en tejidos destinados expresamente a la acumulación de sílice. Como resultado final, el mineral adopta la forma de los tejidos circundantes dando lugar a moldes microscópicos.

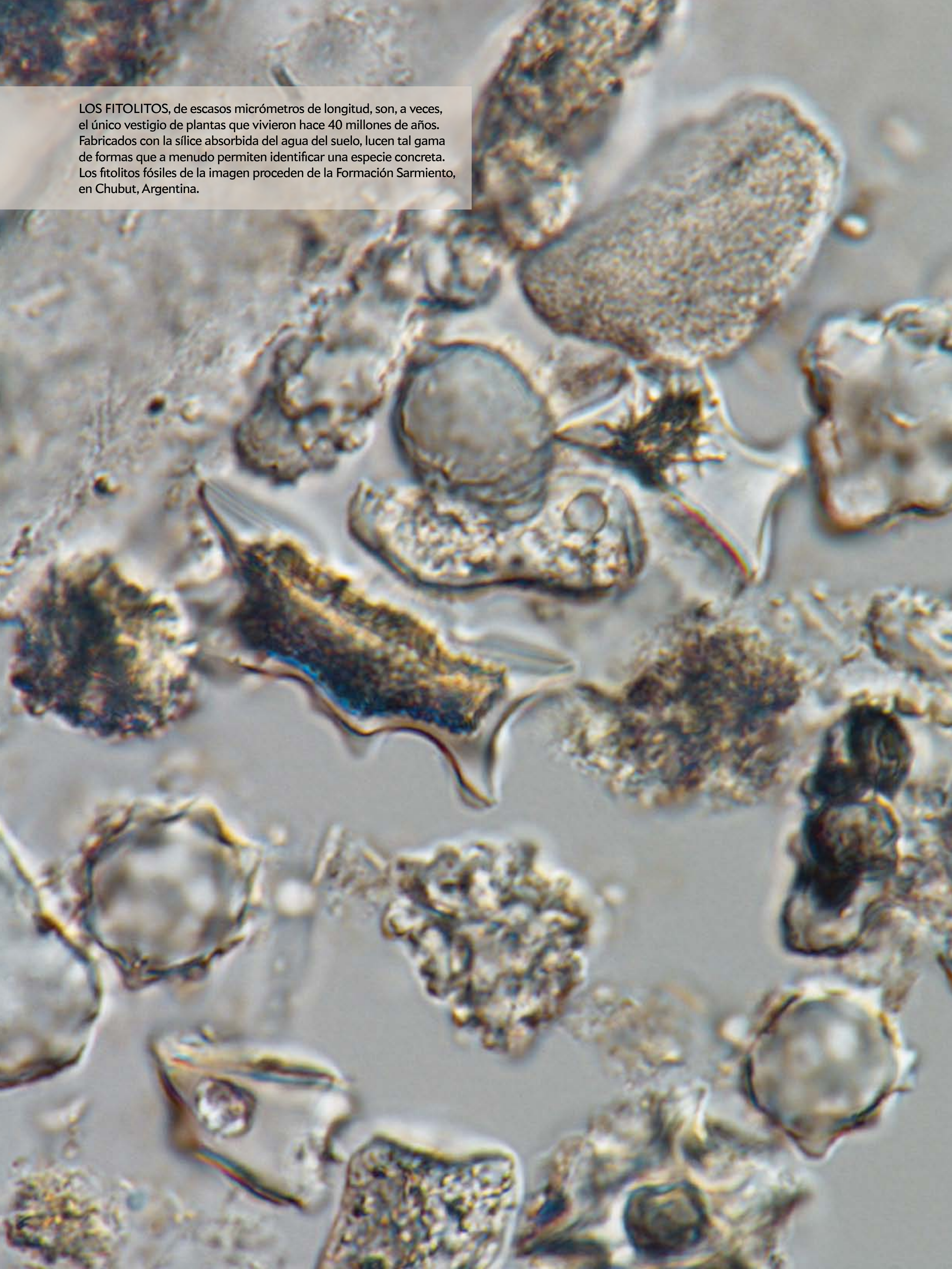
Los fitolitos son propios de taxones presentes en casi todo tipo de ambientes: angiospermas (plantas con flor), gimnosper-

EN SÍNTESIS

Los fitolitos son corpúsculos microscópicos creados por la acumulación de sílice en los tejidos vegetales. Cuando la planta muere, sobreviven al paso del tiempo como muy pocos vestigios.

Su durabilidad y especificidad los convierte en soberbios testimonios de la vegetación pretérita, cuyo estudio reviste gran relevancia en disciplinas como la arqueología, la ecología o la paleontología.

Lejos de limitarse al pasado, también se investiga su uso como materia prima para aplicaciones nanotecnológicas y como sumidero de carbono para afrontar el cambio climático.



LOS FITOLITOS, de escasos micrómetros de longitud, son, a veces, el único vestigio de plantas que vivieron hace 40 millones de años. Fabricados con la sílice absorbida del agua del suelo, lucen tal gama de formas que a menudo permiten identificar una especie concreta. Los fitolitos fósiles de la imagen proceden de la Formación Sarmiento, en Chubut, Argentina.

mas (coníferas, cícadas, ginkgo y gnetales) y pteridófitos (helechos). Por esa razón suelen acumularse en grandes cantidades en el suelo. Estos corpúsculos microscópicos cristalinos están compuestos fundamentalmente por dióxido de silicio (SiO_2), agua y carbono orgánico, amén de cantidades ínfimas de otros elementos, como aluminio, hierro, magnesio, manganeso, fósforo, cobre y nitrógeno. Su tonalidad va del marrón claro al oscuro, aunque la mayoría son ligeramente transparentes, con un tamaño de uno a más de cien micrómetros.

Estudios recientes atribuyen a los fitolitos funciones protectoras, estructurales y fisiológicas. Los mismos genes que regulan la síntesis de lignina, sustancia vegetal que actúa como mecanismo de defensa, controlan la formación de los fitolitos. La acumulación de gran cantidad de ellos en los tejidos los convierte en correosos e indigestos, poco apetecibles para los herbívoros y los hongos. En ciertos tejidos, como las hojas y los tallos del arroz, cumplen una función estructural, pues ayudan a mantener erguida la planta y mejoran así la captación de la luz solar. También desempeñan un cometido importante en la fisiología vegetal porque retienen metales pesados tóxicos, como el manganeso y el aluminio. Pero no resulta fácil afirmar con certeza si la planta los fabrica con ese fin o son simplemente un subproducto de otros procesos desconocidos.

Darwin no supo reconocer la importancia de esos corpúsculos; aún hoy no se comprende plenamente su finalidad. Pero si bien su función biológica sigue siendo una incógnita, su relevancia no lo es en absoluto. Los fitolitos han resultado ser cronoindicadores sensacionales y biomateriales primorosos. Gracias a esas virtudes, no cesan de aparecer nuevas aplicaciones en disciplinas tan diversas como la paleontología, la arqueología, la primatología o la medicina forense, y ocupan la vanguardia de la técnica en nanotecnología y ciencias ambientales.

RETRATOS DEL PASADO

La durabilidad de los fitolitos tal vez no sea un factor clave para la planta viva, pero sin duda lo es cuando muere. Los procedentes de plantas muertas en el pasado remoto pueden persistir millones de años y resistir temperaturas del orden de mil grados. Por esa razón, los hallados en los yacimientos arqueológicos constituyen una importante fuente de información, sobre todo en conjunción con otros artefactos. Pertenecen a una clase de vestigios llamados ecodatos*,* categoría que engloba los restos óseos de animales, parásitos, restos vegetales carbonizados, desecados o saturados de agua, polen, granos de almidón y cristales de oxalato cálcico. Los fitolitos resultan especialmente útiles para los investigadores porque su morfología es en ocasiones exclusiva de una familia, un género, una especie o subespecie, o incluso de una parte de la anatomía vegetal.

Casi siempre constituyen un testimonio de la vegetación pasada porque permanecen químicamente unidos al suelo tras la descomposición de la planta. Existen excepciones notorias, como la situación que Darwin presenció. En ese caso acabaron a bordo del *Beagle* porque las condiciones extremadamente áridas y ventosas los arrancaron del suelo de África occidental. Los fitolitos sobreviven en las heces fosilizadas (coprolitos), la placa dental y los dientes, así como en la superficie de artefactos. La posibilidad de distinguir entre los fitolitos de taxones silvestres y cultivados, así como de partes concretas de la planta, los convierte en un instrumento de investigación soberbio.

Los fitolitos han permitido entender mejor la evolución vegetal, animal y de los homininos porque, a diferencia de la materia orgánica, no se descomponen. Su presencia en testigos de perforación extraídos de lagos, turberas, suelos y sedimentos marinos profundos de hasta 35 millones de años de antigüedad ha ayudado a reconstruir el clima del pasado remoto. Los fitolitos aportan datos complementarios porque permanecen en el lugar donde quedaron depositados. En cambio, el polen, sobre todo el engendrado por las plantas que dependen del viento para propagarse, se dispersa por doquier y solo sirve como indicador regional.

La aparición de los ecosistemas dominados por las plantas gramíneas (familia de las poáceas) en el Mesozoico y el Cenozoico, hace 70 millones de años, supuso un giro fundamental en la historia terrestre, que ha sido llamado la «Gran Transformación». Este período dio lugar a la expansión de ecosistemas como las praderas templadas, las estepas y las sabanas tropicales y subtropicales. El momento exacto de esa transición ha sido objeto de enconados debates por sus implicaciones para la evolución animal y vegetal. Caroline Strömberg, de la Universidad de Washington, y sus colaboradores recuperaron en coprolitos de titanosaurio del Cretácico superior de la India una serie de fitolitos que reveló la variada dieta de estos colosales herbívoros: hierbas, coníferas, cícadas y dicotiledóneas como las palmeras. Esta información indica que las gramíneas evolucionaron en ambientes boscosos antes de conquistar vastos ecosistemas. Esa evolución explica por qué la fauna coetánea, como la mayoría de los titanosaurios, carecía de la dentición especializada para triturar la materia vegetal dura, y apunta a que algunos evolucionaron en paralelo con las gramíneas mientras que otros desarrollaron una nueva dentición para prosperar en los nuevos ecosistemas en auge.

Los investigadores también recurren a los fitolitos para recomponer la alimentación de animales extintos, como el primate gigante *Gigantopithecus blackii* y el mastodonte americano, *Mammut americanum*. *G. blackii* era un primate superior de hábitos terrícolas y pronador que vagaba por los bosques de China y Vietnam hace entre 200.000 y 6 millones de años. Los machos alcanzaban los tres metros de estatura y la media tonelada de peso; su pariente más cercano es el orangután. Los fitolitos incrustados en los dientes de *Gigantopithecus* revelan una alimentación variada a base de gramíneas, como bambúes, y de dicotiledóneas, como el durión o el árbol del pan. Este descubrimiento, realizado en 1990 por Dolores Piperno, del Instituto Smithsoniano, y sus colaboradores, fue pionero en demostrar que los fitolitos quedan conservados en la superficie de las piezas dentales. También hizo patente su importancia a la hora de entender la relación entre la evolución de los primates y su alimentación, pues permitió comenzar a contrastar hipótesis sobre la dieta y el hábitat de los primates superiores extintos.

El mastodonte americano vagó por gran parte de Norteamérica desde hace 1,8 millones de años hasta apenas 10.000 años atrás. Se creía que este mamífero lanudo pastaba sobre todo en los bosques. Pero los fitolitos alojados en el sarro dental de tres ejemplares descubiertos en Kansas y datados de hace entre 11.500 y 13.890 años rebaten esa hipótesis y revelan una dieta dominada por las hierbas, con algún que otro almez y plantas leñosas para variar. Los fitolitos de gramíneas pertenecen a la

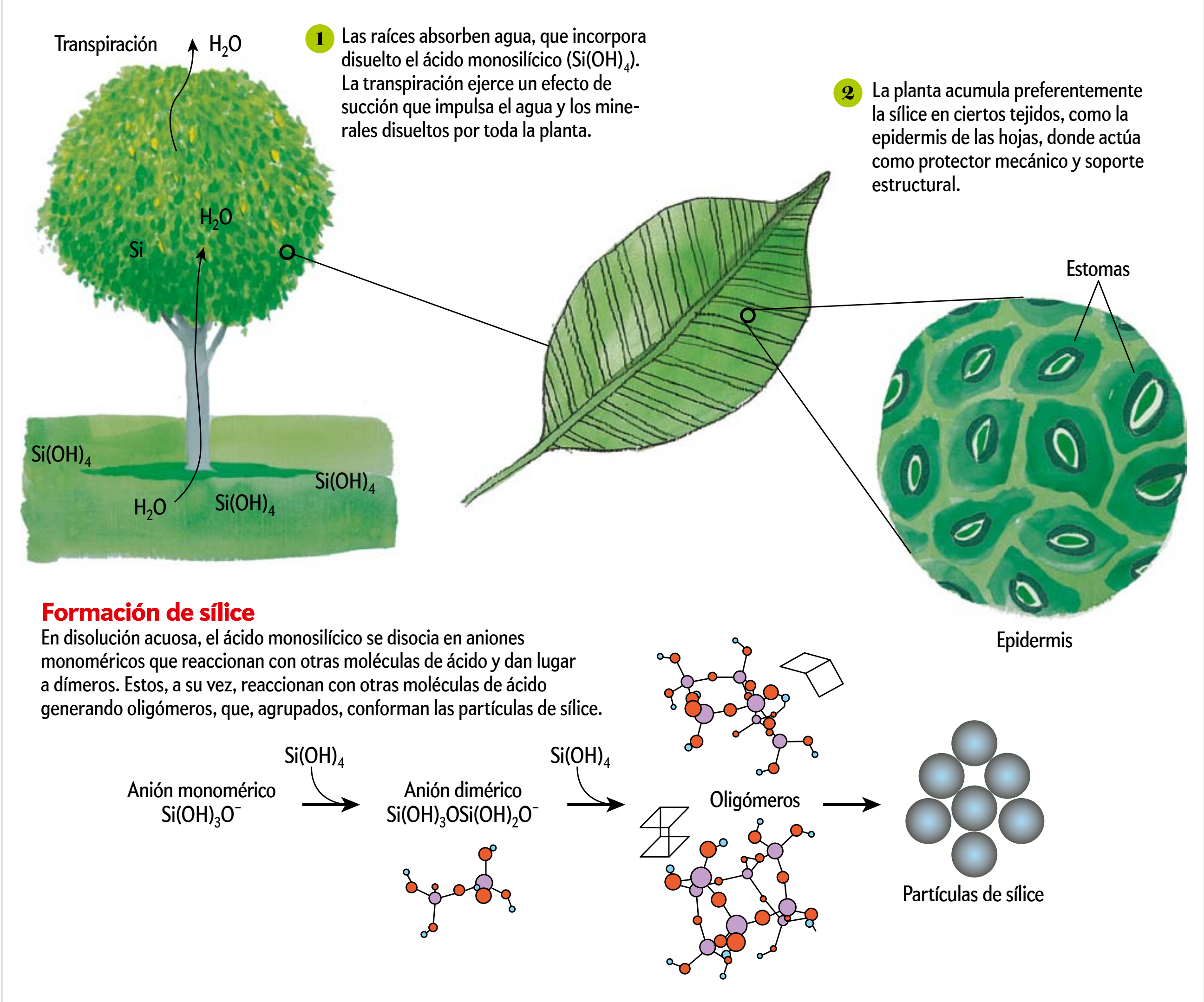


Thomas C. Hart dirige el laboratorio de arqueología ambiental de la Universidad de Texas en Austin. Utiliza la arqueología y los restos vegetales para investigar las adaptaciones del ser humano a los cambios ambientales en el albor de las sociedades organizadas del sudoeste de Asia y en el poblamiento de América.

PARTÍCULAS DE SÍLICE

La materia prima de los fitolitos

La formación de los fitolitos comienza con la absorción de ácido monosilícico disuelto en el agua del suelo. Durante la transpiración, la planta expele agua a través de los estomas (poros de las hojas) y deposita la sílice. El ácido monosilícico sufre diversas transformaciones antes de acabar convertido en sílice, que, depositada en células y tejidos, acaba adoptando su forma.



SIGMA XI/*AMERICAN SCIENTIST*; CORTESÍA DE CAROLINE PERRY (*formación de sílice*)

subfamilia de las pooideas y, junto con las diatomeas atrapadas en el sarro, indican que pastaban en un entorno frío, húmedo y abierto y no en un bosque del Pleistoceno superior. El estudio, dirigido en 2001 por Katrina Gobetz, de la Universidad James Madison, y Steven Bozarth, de la Universidad de Kansas, fue uno de los primeros en demostrar que es posible recuperar fitolitos de la placa dental.

LA ALIMENTACIÓN DE LOS HUMANOS

En 2012, un estudio dirigido por Amanda G. Henry, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, que analizó los fitolitos hallados en el sarro de un antepasado humano que vivió hace 2 millones de años, *Australopithecus sediba,* reveló que este bípedo primitivo ingería una mezcla de carrizos tropicales acuáticos y umbrófilos, hierbas, frutos y hojas. Hasta entonces, la mayoría de las pruebas arqueológicas empleadas para reconstruir la dieta de los ancestros humanos (los homininos) estaban basadas en la industria lítica, en los restos óseos de animales y de homininos y en el análisis químico de los isótopos de carbono y nitrógeno.

Los fitolitos también han sido utilizados para descifrar las actividades de los homininos. En Peninj, Tanzania, Manuel Domínguez Rodrigo, de la Universidad Complutense de Madrid, y sus colaboradores recuperaron fitolitos de acacia incrustados en hachas bifaces de 1,5 a 1,7 millones de años de antigüedad. Quienquiera que las usara por última vez, probablemente *Homo erectus*, practicaba alguna labor de talla. Los artefactos no se han conservado, pero es posible que fabricasen útiles de madera, actividad de la que no se encuentran vestigios hasta un millón de años más tarde.

La alimentación vegetal y las actividades de los neandertales (*Homo neanderthalensis*) constituyen otro campo en que los fitolitos han demostrado ser proverbiales. En contra de la creen-



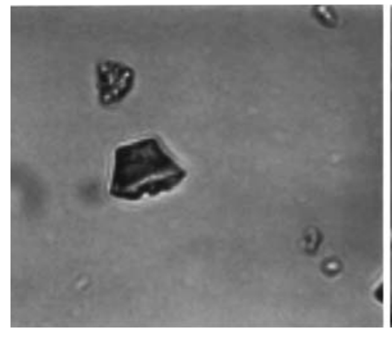


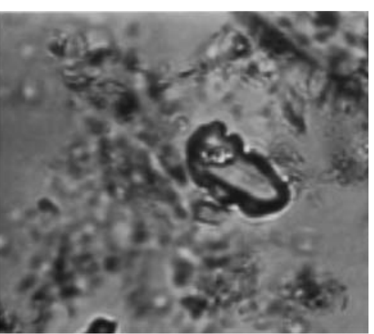
LOS TITANOSAURIOS (*derecha*) eran herbívoros colosales que habitaron la Tierra hace entre 66 y 90 millones de años. Los fitolitos hallados en sus coprolitos (*izquierda*) han permitido conocer su variada dieta vegetal. Y, junto con el estudio de su dentición, han ayudado a descifrar el origen de las praderas.

cia general que les atribuía una alimentación eminentemente carnívora, el reciente trabajo del equipo de Henry y Piperno sobre el sarro de los neandertales revela la ingesta de plantas como la palmera datilera (género *Phoenix*) en Irak o de raíces y tubérculos en Bélgica. En la gruta de Tor Faraj, en Jordania, se recuperaron fitolitos de plantas leñosas en la boca de la cueva, lo cual indica que sus moradores las usaron como paravientos hace entre 49.000 y 69.000 años. En el interior se han descubierto fitolitos de palmera datilera y cascarilla de semillas de gramíneas en torno al núcleo central, de lo que se deduce que en ese lugar se solían manipular vegetales. La gran cantidad de fitolitos de gramínea hallados en el tramo que separa el centro del fondo de la gruta indican el uso de hierbas para acondicionar los lechos. Los fitolitos también han permitido reconstruir las zonas de actividad de los neandertales y de los humanos anatómicamente modernos en otras grutas. Estos estudios fueron pioneros en aportar indicios de que los neandertales practicaban tales actividades y podrían proporcionar algunas pistas preliminares de su organización social.

El análisis de los fitolitos ha servido para conocer el origen y la difusión de importantes especies cultivadas. Tales pruebas son especialmente valiosas en los trópicos húmedos, donde los restos vegetales de otra naturaleza no se conservan bien. Piperno y Deborah Pearsall, de la Universidad de Missouri, descubrieron que las hojas y las mazorcas del maíz cultivado (*Zea mays*) y de su antecesor silvestre, el teosinte, producen distintos tipos de fitolitos cruciformes. El descubrimiento, aunado con otras pruebas, ha permitido ubicar con precisión la cuna del cultivo del maíz en el valle del río Balsas, en el sudoeste de México, hace 8000 o 9000 años. Técnicas de estudio similares están siendo utilizadas para dilucidar los centros primigenios del cultivo del arroz (*Oryza sativa*), el trigo (*Triticum aestivum*), la cebada (*Hordeum vulgare*), el banano (género *Musa*) y el falso banano (género *Ensete*).

El análisis de los fitolitos puede enriquecer notablemente los estudios arqueológicos, incluso en aquellos casos en que abundan los artefactos identificables. En la tesis doctoral que defendí en la Universidad de Connecticut, analicé los fitolitos y los granos de almidón microscópicos hallados en sedimentos antiguos y en sarro humano de la población mesopotámica de Tell Zeidan, en Siria. Tell Zeidan era un asentamiento situado en la confluencia de los ríos Éufrates y Balikh en el norte de Siria, habitado entre el 6000 y 3800 a.C., en pleno florecimiento de las primeras sociedades organizadas. Los fitolitos recuperados en el yacimiento, como los procedentes de los frágiles tejidos foliares de los árboles y la vegetación palustre, indican por primera vez





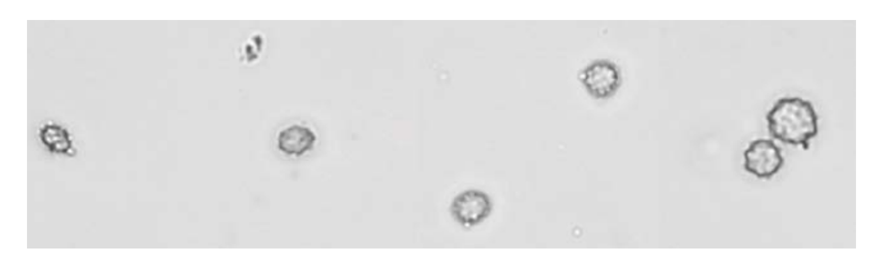


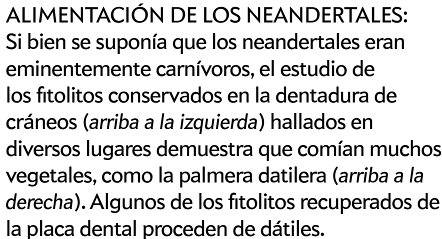
FITOLITOS EN LOS DIENTES: El estudio de la dentición del mastodonte americano (*arriba*) demostró por primera vez que era posible recuperar fitolitos de la placa dental. Estos fitolitos (*izquierda*) rebatieron la teoría de que pastaban sobre todo en los bosques al revelar el predominio de las herbáceas en su alimentación.











ALIMENTACIÓN DE LOS NEANDERTALES: Si bien se suponía que los neandertales eran eminentemente carnívoros, el estudio de los fitolitos conservados en la dentadura de cráneos (*arriba a la izquierda*) hallados en diversos lugares demuestra que comían muchos vegetales, como la palmera datilera (*arriba a la derecha*). Algunos de los fitolitos recuperados de la placa dental proceden de dátiles.

INSTITUCIÓN SMITHSONIANA, HUMAN ORIGINS PROGRAM (*cráneo*); CORTESÍA DE DOLORES PIPERNO (*fitolitos de palma*)

que los pobladores aprovechaban los humedales y los bosques cercanos como fuente de leña y de material de construcción. Estos datos complementan la madera carbonizada y los fragmentos de semillas hallados en el lugar, puesto que las hojas de los árboles y de las plantas palustres raramente se conservan. La combinación de esos datos servirá para conocer el papel de las plantas y de la agricultura en el desarrollo de una de las primeras sociedades organizadas de la historia.

En la tesina de mi máster, cursado en la Universidad de Missouri, examiné los fitolitos y los granos de almidón hallados en pedazos de cerámica y en suelo del medievo procedentes de Glebe Cottage, en Northamptonshire, y de Durley Cottage, en Cambridgeshire, Inglaterra, y comparé estos datos con los hábitos de cultivo registrados en ambos lugares. Los resultados indican que, si bien el *dredge* (mezcla de avena y cebada) y el centeno eran los cultivos predominantes, los lugareños consumían una dieta ligeramente distinta, a base de trigo, cebada y legumbres. Esto indica que, a semejanza de tantas otras sociedades agrarias de todo el mundo, el grueso de la cosecha se vendía y el sustento del campesino consistía en otros alimentos cultivados por cuenta propia. Otro ejemplo de información aportada por los fitolitos para los estudios históricos es la reconstrucción de las zonas de actividad de una granja y una huerta del siglo xvii cercanas a la localidad estadounidense de Williamsburg. Los estudiosos del yacimiento descubrieron nuevos huertos, pastos y campos de labor cercanos a la granja colonial y se percataron de que las zonas de actividad estaban mucho más organizadas de lo que se pensaba en una hacienda del siglo xvii. Sus investigaciones demuestran que los colonos del lugar habían delimitado con claridad el uso de las tierras y adoptaban estrategias económicas menos arriesgadas que en otros parajes de la Virginia colonial.

DATACIÓN CON CARBONO DE ECOSISTEMAS PRIMITIVOS

La datación precisa es vital para entender mejor los yacimientos arqueológicos y es otro aspecto más en el que los fitolitos pueden ser de ayuda. Aparte de los materiales usuales como la madera, las semillas o los huesos carbonizados, los fitolitos también son aptos para la datación con carbono radioactivo. La espectrometría de masas con acelerador de partículas (AMS) es una modalidad de datación con radiocarbono que utiliza una muestra minúscula, del tamaño de un céntimo, para medir la cantidad de carbono 14 radioactivo y determinar la edad de una muestra orgánica. En la datación arqueológica suele prepararse un único fragmento de madera o una semilla chamuscada que representa un solo momento. Pero no todos los contextos arqueológicos y paleoecológicos proporcionan muestras adecuadas. En tal caso se puede recurrir al carbono atrapado en los fitolitos para disponer de una serie de dataciones.

La sílice del fitolito protege el carbono atrapado de los procesos de fosilización y meteorización y de los productos químicos cáusticos con los que se eliminan los contaminantes en los preparativos de la AMS. Los millares de fitolitos que contiene una muestra de suelo ofrecen un lapso de tiempo, en lugar de una fecha concreta. Este análisis resulta especialmente útil si no se dispone de los materiales habituales para la datación por radiocarbono o las muestras están contaminadas por materiales ricos en bicarbonatos, como la piedra calcárea.

El carbono atrapado en los fitolitos puede ser utilizado para medir la proporción de isótopos de carbono 12 y carbono 13 en los tejidos vegetales. Las plantas prefieren el primero cuando captan el dióxido de carbono para la fotosíntesis. Algunas toleran niveles muy elevados de carbono 13 y son conocidas habitualmente como plantas C4 (por el tipo de ciclo fotosintético,

que da como resultado un compuesto con cuatro átomos de carbono). Este tipo de plantas resiste las sequías, prefiere altas intensidades lumínicas y conforma cerca de la mitad de las gramíneas del planeta. En cambio otras, las C3 (la mayoría de los árboles y arbustos y las gramíneas cultivadas) gustan de luminosidad y temperatura moderadas, humedad abundante y no toleran concentraciones excesivas de carbono 13 en los tejidos.

Los arqueólogos y los paleoecólogos aprovechan esa información para reconstruir a grandes rasgos la vegetación de una región y las condiciones ambientales en que crecieron las plantas. Los isótopos de oxígeno, hidrógeno y aluminio presentes en los fitolitos también podrían resultar útiles de modo similar, pero se precisan nuevos estudios para confirmar la viabilidad del análisis.

CRIMINALÍSTICA Y NANOTECNOLOGÍA

La mayor parte de la investigación sobre fitolitos ha girado hasta la fecha en torno a aspectos del pasado. Pero las cualidades que los hacen tan valiosos en ese tipo de estudios, como su larga vida y su especificidad taxonómica, resultan también útiles en el estudio del presente.

Un trabajo reciente de Henry demuestra las posibilidades que abren los fitolitos y los granos de almidón en el estudio de la alimentación de los primates actuales, uno de los aspectos más difíciles de la investigación primatológica. Consignar la alimentación de un animal exige varios pasos, entre ellos la observación de sus hábitos (que puede ser especialmente difícil si los animales corren a esconderse para comer) y el examen de sus heces, que a menudo culminan en una lista incompleta de datos. Esa información perdida la aportan los granos de almidón y los fitolitos contenidos en las heces y en muestras de suelo, en útiles como las piedras usadas para cascar los frutos duros y en el sarro raspado a ejemplares adormecidos. Semejante aplicación está en pañales en primatología y podría ser extensible a otros animales.

Aparte de los avances logrados en el estudio de la nutrición, los fitolitos también prestan servicio a la justicia. La criminalística los considera un tipo de prueba indiciaria, y la botánica forense ha permitido resolver investigaciones criminales. En Spokane, una localidad del estado de Washington, los fitolitos ayudaron a resolver el caso de un hombre acusado de incendio premeditado, fraude y filicidio. El domicilio del sospechoso había ardido en circunstancias extrañas mientras la póliza de seguro del propietario permanecía a buen recaudo en el domicilio del vecino, y su hijo, cuyo paradero había dicho ignorar el sospechoso, fue hallado muerto dos días después. Según su declaración, relatada en el informe de un especialista forense que intervino en el caso, la suciedad y los daños de la camioneta se produjeron al salir de la calzada en cierta carretera. Sin embargo, los fitolitos extraídos del vehículo no coincidían con los del tramo de carretera referido por el sospechoso, sino con los del suelo donde había sido hallado el cadáver de su hijo. Esta prueba fue una de las piezas del rompecabezas que ayudaron a resolver el filicidio y el modo en que el culpable se deshizo del cuerpo, por lo que fue condenado.

En otro orden de cosas, algunas de las propiedades físicas de los fitolitos los convierten en candidatos para aplicaciones en el campo de la nanotecnología. Tal y como Suresh Neethirajan, Richard Gordon y Lijun Wang describían en un artículo de 2009, se pueden aprovechar directamente los fitolitos extraídos de los tejidos vegetales o bien crear corpúsculos artificiales con un proceso similar al natural. La mayor parte de la investigación preliminar se ha centrado hasta el momento en la primera opción. Por ejemplo, los fitolitos fabricados por las hojas de la agróstide palustre (*Agrostis palustris*) reducen el calentamiento de la planta, tal y como evidencian las imágenes de termografía infrarroja; ello demuestra sus posibilidades en dispositivos de protección eléctrica, como disyuntores y fusibles térmicos, termistores con coeficiente de temperatura positivo (cuya resistencia varía con la temperatura) y termopares con los que se equipan los aparatos electrónicos y los electrodomésticos.

Otras posibles aplicaciones nanotecnológicas de los fitolitos incluyen plaguicidas a base de sílice, nanocompuestos o sistemas de liberación enzimática para medicamentos. Los plaguicidas contienen sílice amorfa procedente de fitolitos fundidos, obtenidos de la paja del arroz. La sílice altera la capacidad de retención de agua de los lípidos de la cutícula que cubre el cuerpo del





EL ORIGEN DEL MAÍZ: La especie actual (*derecha*) y su antecesor silvestre, el teosinte (*izquierda*), producen distintos tipos de fitolitos con forma de arandela. Ello permite distinguir las mazorcas y las hojas en los yacimientos arqueológicos. Este descubrimiento sitúa con precisión la cuna del maíz en el sudoeste de México, hace entre 8000 y 9000 años.

CORTESÍA DE DOLORES PIPERNO

VARIEDAD DE FORMAS: Esta colección de fitolitos recolectada en el suelo de una selva montana de Panamá muestra el abanico de formas que puede albergar un pequeño espacio e ilustra su utilidad en la identificación de las plantas. La fotografía contiene un fitolito poliédrico de magnolio (*a*), *Marantaceae* (*b*) y palmeras (*c*). Otros aparecen identificados únicamente por la forma, como el de esclereida (tipo de célula vegetal) (*d*), los esféricos, lisos y verrugados (*e*), y el de árbol, profusamente ornamentado (*f*). Los fitolitos desconocidos se indican con una *(u)*.



CORTESÍA DE DOLORES PIPERNO

insecto, que muere deshidratado. Los fitolitos son la materia prima para crear nanocompuestos a partir de su fusión, que los reduce a su estructura básica, y posterior modelado en aniones de octosilicato, uno de los elementos básicos de las estructuras nanocompuestas. La morfología de los fitolitos fundidos también los convierte en especialmente aptos para retener compuestos orgánicos y enzimas que después se liberan en el organismo como parte de tratamientos farmacológicos.

Investigadores de Australia y China han comenzado a estudiar el aprovechamiento de los fitolitos como sumideros de carbono, con el fin de reducir los niveles atmosféricos de dióxido de carbono. La formación de los fitolitos atrapa carbono atmosférico (el mismo detectado en la datación por radiocarbono y en los análisis de isótopos estables), que queda retenido en el suelo cuando la planta muere. Una de las hipótesis en boga sobre el secuestro de carbono y la agricultura es que las plantas desprenden más carbono cuando mueren del que queda atrapado en los fitolitos. De ser cierta, los cultivos no serían un medio eficaz para combatir el cambio climático. Pero Xin Xin Zuo y Hou Yuan Yu, de la Academia China de Ciencias, han cuantificado el carbono atrapado por el mijo (*Panicum miliaceum*) y el panizo (*Setaria italica*) en cultivos de secano y han demostrado la falsedad de la idea. Según sus cálculos, ambos cereales secuestran unas 0,020 toneladas de carbono por hectárea. Calculan que, con la actual superficie cultivada en China, el mijo podría extraer de la atmósfera más dióxido de carbono del que desprende: del orden de 2.370.000 toneladas al año.

Jeff Parr y otros especialistas australianos han examinado el secuestro de carbono en bambúes de interés económico y sostienen que si los actuales 22 millones de hectáreas de bosques de bambú fueran gestionados adecuadamente para aumentar la producción de fitolitos, el suelo retendría 15.600.000 toneladas de dióxido de carbono. Parr y otros usan estos datos para plantear que el incremento actual de las emisiones globales de CO_2 se reduciría cerca del 11 por ciento si el bambú, o cualquier otra planta con altos índices de retención de carbono, creciera en los 4100 millones de hectáreas de suelo cultivable del planeta.

Es evidente que estos corpúsculos microscópicos, creados por las plantas para sus propios fines, aún tienen muchas aplicaciones por descubrir. Cuando Charles Darwin halló ese polvo fino a bordo del *Beagle,* no pudo imaginar la capacidad de esas partículas de sílice para desvelar nuestro pasado y nuestro presente, ni sospechar sus aplicaciones en técnicas futuristas ni su potencial para modelar el planeta. Los fitolitos, diminutos y variados como son, siguen demostrando su durabilidad y utilidad. Estas piedras vegetales traslúcidas tienen millones de años por delante para narrar más detalles sobre su historia y la nuestra.

PARA SABER MÁS

Paleoethnobotany: A handbook of procedures (2.ª edición). D. M. Pearsall. Academic Press, San Diego, 2000.

Woodworking activities by early humans: A plant residue analysis on acheulian stone tools from Peninj (Tanzania). M. M. Domínguez Rodrigo et al. en *Journal of Human Evolution*, vol. 40, págs. 289-299, 2001. doi:10.1006/jhev.2000.0466.

Cereal murder in Spokane. W. M. Schneck en *Trace evidence analysis: More cases in mute witnesses*, dirigido por M. M. Houck, págs. 165-190, Elsevier Academic Press, Burlington, MA, 2004.

Phytoliths: A comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists. D. R. Piperno. AltaMira Press, Lanham, MD., 2006.

Microfossils in calculus demonstrate consumption of plants and cooked foods in Neanderthal diets (Shanidar III, Iraq; Spy I and II, Belgium). A. G. Henry, A. S. Brooks y D. R. Piperno en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, vol. 108, págs. 486-491, 2011. doi:10.1073/pnas.1016868108/-/DCSupplemental.

Carbon sequestration within millet phytoliths from dry-farming of crops in China. X. Zuo y H. Lu en *Chinese Science Bulletin*, vol. 56, págs. 3451-3456, 2011. doi:10.1007/s11434-011-4674-x.

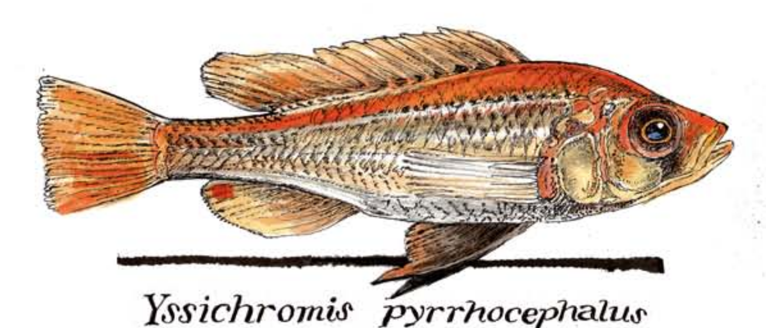


EVOLUCIÓN

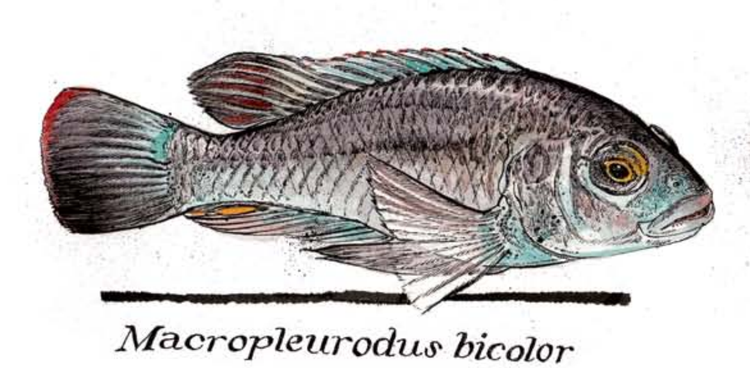
LA VERTIGINOSA EVOLUCIÓN DE LOS CÍCLIDOS

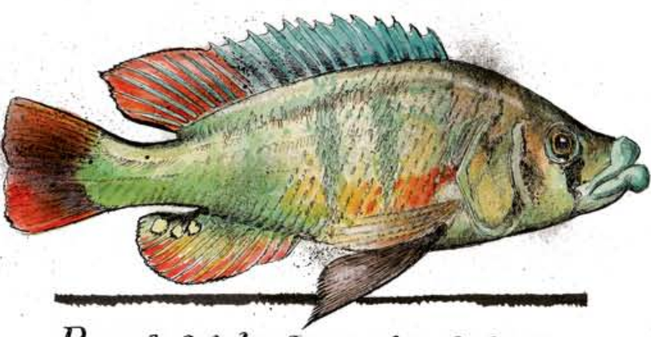
Estos peces han experimentado un proceso de especiación asombroso. Nuevas investigaciones están revelando los rasgos de su genoma que han facilitado esta espectacular diversificación

Axel Meyer

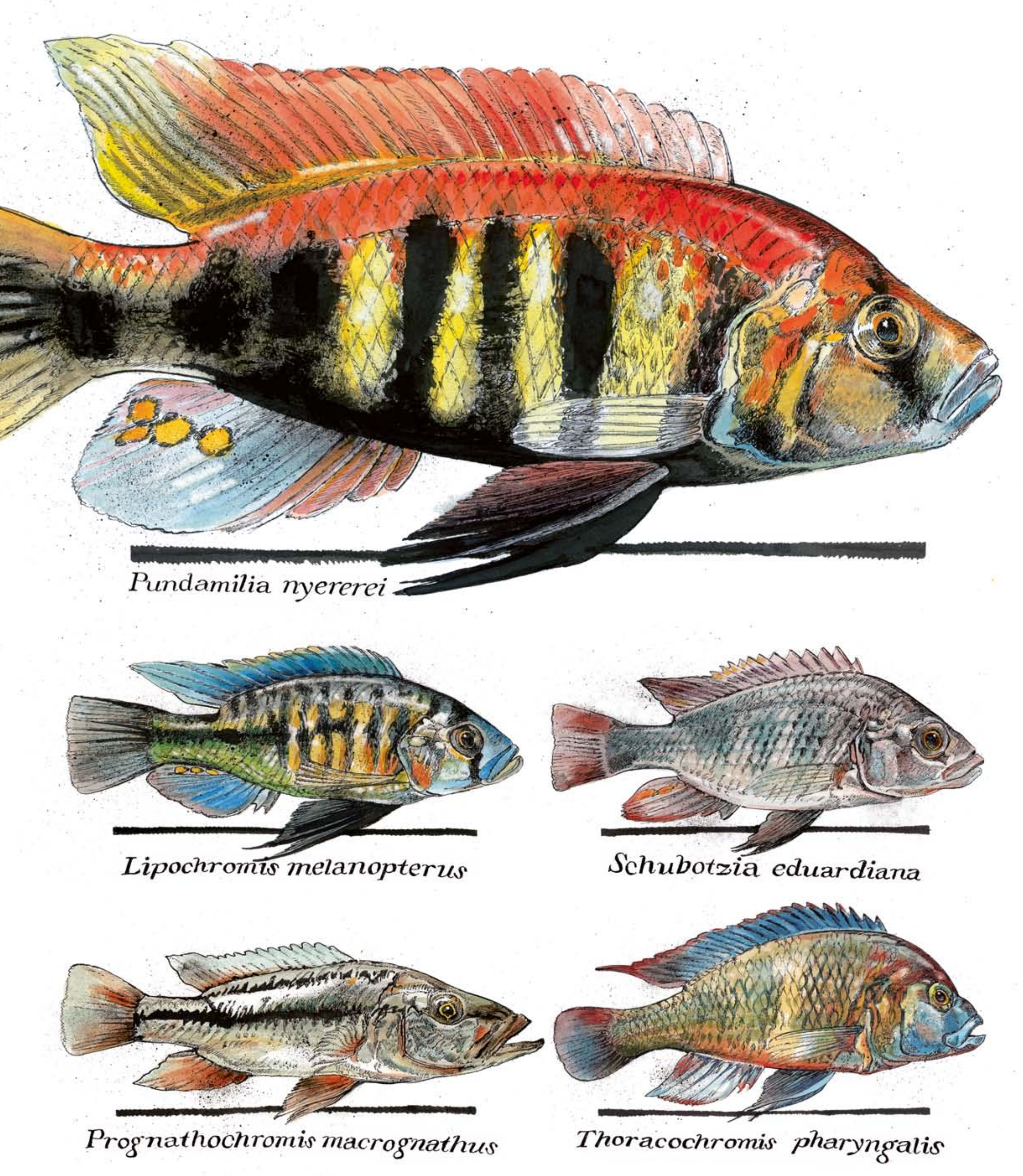








LA VARIEDAD DE CÍCLIDOS que habita en las aguas del lago Victoria es asombrosa. El medio millar de especies que acoge el lago (algunas



de las cuales se ilustran aquí) podrían haber surgido en los últimos 15.000 años, un lapso de tiempo extraordinariamente breve.

Axel Meyer es profesor de zoología y biología evolutiva en la Universidad de Constanza. Estudia el origen de las adaptaciones y de la biodiversidad, tanto a escala molecular como de los individuos. Ha sido pionero en la aplicación de la secuenciación del ADN para estudiar las diferencias entre especies y la especiación.



El lago Victoria es el laboratorio viviente que acoge uno de los mayores experimentos de la evolución. Lo que comenzó en sus aguas como un linaje propio de la familia de los cíclidos ha dado origen, desde entonces, a un profuso abanico de formas. A semejanza de los célebres pinzones de Darwin, cuyos picos de diversa talla y forma aprovechan los variados recursos alimentarios que ofrecen las Galápagos, estos cíclidos encarnan un ejemplo arquetípico de lo que los biólogos llaman radiación adaptativa, el fenómeno por el que un linaje engendra numerosas especies adaptadas a un mosaico de nichos ecológicos. Pero los cíclidos del lago Victoria superan con creces a los pinzones en un aspecto: la asombrosa velocidad con la que se han diversificado. El medio millar largo de especies que nada en sus aguas, y solo en ellas, ha surgido en los últimos 10.000 o 15.000 años (un abrir y cerrar de ojos en la escala geológica) frente a los millones de años que precisaron las 14 especies de pinzón.

El lago Victoria no es el único hogar de los cíclidos. Otros lagos y ríos tropicales de África, América y el extremo del subcontinente indio albergan especies autóctonas de esta familia. En total, se calcula que la integran más de 2500 especies. Algunos, como las tilapias, se crían en granjas piscícolas y constituyen uno de los pescados más importantes del mundo. Muchos otros, como los óscar y los peces ángel, son muy apreciados por los acuariófilos por su belleza y hacen gala de variados rituales de cortejo y cuidados parentales. Numerosas especies aguardan una descripción formal. Los cíclidos comparten los lagos con otros tipos de peces, pero solo ellos han logrado diversificarse tanto y tan rápido. Ningún otro grupo de vertebrados puede rivalizar con ellos en abundancia de especies y en variedad de formas, colorido y comportamiento. Pero, al mismo tiempo, la evolución se ha repetido a sí misma varias veces en la familia: en una tendencia curiosa, ciertas adaptaciones han aparecido de modo simultáneo en distintos linajes de cíclidos.

A varios científicos nos cautivan desde hace muchos años las múltiples formas adoptadas por los cíclidos y nos hemos preguntado por los factores que han permitido semejante diferenciación. Los últimos avances en las técnicas de secuenciación genómica han permitido escudriñar su ADN en busca de pistas sobre su evolución, pero el rompecabezas de la diversidad de los cíclidos no está resuelto, ni mucho menos. No obstante, han aflorado algunas peculiaridades del genoma que podrían haber desatado la fulgurante diversificación y, al mismo tiempo, la aparición reiterada de ciertos rasgos. El estudio de la base genética del extraordinario éxito de este grupo de peces está arrojando luz sobre los engranajes mismos de la evolución, lo cual ayudará a desvelar los orígenes de todo tipo de especies.

DIFERENTES PERO IGUALES

Para obtener una visión clara de la asombrosa diversidad de los cíclidos es preciso pensar en las formas del lago Victoria y de los otros dos lagos donde tuvieron lugar las grandes radiaciones de cíclidos de África oriental: el lago Malawi, que tal vez albergue entre 800 y 1000 especies, y el Tanganica, con su cuarto de millar de especies de los linajes más antiguos de los cíclidos, una de las cuales colonizó los otros dos lagos más jóvenes y propició las radiaciones en su seno. Estos cíclidos exhiben todas las tonalidades del arco iris y su tamaño varía desde escasos centímetros hasta un metro de longitud. Y han desarrollado adaptaciones para devorar cualquier cosa comestible de su entorno. Los raspadores de algas poseen dientes planos como los incisivos humanos para roer el nutritivo tapiz verde que recubre las rocas sumergidas; los insectívoros están dotados de dientes largos y puntiagudos para capturar presas en las grietas de las rocas; los piscívoros despliegan sus enormes mandíbulas extensibles para engullir en milisegundos a los incautos. Estas son solo algunas de las grandes categorías de especialización. Así, entre los raspadores de algas hallamos algunos que se han adaptado a alimentarse en el rompiente de las olas, otros a rebuscar en ciertos montones de rocas concretos, y otros que mordisquean los tapices de algas solo en determinados ángulos o solo los compuestos por un tipo de alga.

Pero, a pesar de toda esa variedad, los cíclidos de África oriental lucen rasgos muy especializados que han evolucionado reiteradamente y en un grado sorprendente. Por ejemplo, va-

EN SÍNTESIS

Los peces cíclidos son una de las familias de vertebrados más diversas que se conocen, con más de 2500 especies.

La reciente secuenciación del genoma de varios cíclidos ha comenzado a aportar pistas sobre su asombrosa diversificación.

El genoma de estos peces exhibe rasgos singulares que podrían haber acelerado la evolución del grupo.

Otras peculiaridades del genoma podrían explicar su tendencia a desarrollar de modo independiente las mismas adaptaciones una y otra vez.

PÁGINAS ANTERIORES: ISTOCKPHOTO (*chincheta y tarjeta*); JACK UNRUH (*ilustraciones*)

rios cíclidos de los tres lagos se nutren casi en exclusiva de las escamas de otros peces (lepidofagia). Todos han desarrollado los mismos dientes singulares en forma de rastrillo, con los que sujetan las escamas de sus víctimas. Pero la dentición no es la única adaptación a esa dieta tan particular. Las mandíbulas se han curvado hacia un costado de modo asimétrico, a izquierda o derecha, con el fin de arrancar mejor las escamas de un costado. Los zurdos raspan las escamas del flanco derecho de su víctima; los diestros las del izquierdo. Por muy singulares que nos parezcan las adaptaciones de los lepidófagos, algunos de esos mismos rasgos han surgido por lo menos en tres momentos distintos en esos lagos africanos.

Otra adaptación distintiva que ha aparecido de forma independiente en diferentes ocasiones son los labios gruesos de las especies que buscan presas entre las grietas de las rocas. Varios investigadores hemos demostrado que esos labios de «Angelina Jolie» actúan como ventosas y parachoques que ayudan a succionar a las presas de sus escondrijos. (Los cíclidos desprovistos de esos labios no capturan presas con tanta facilidad en las hendiduras angostas.) Resulta sorprendente que especies de las tres radiaciones africanas y de las dos radiaciones del Nuevo Mundo hayan adquirido ese rasgo en paralelo.

De modo similar, varios linajes de cíclidos han desarrollado libreas distintivas de forma independiente. Si bien la vasta mayoría de los cíclidos lucen franjas oscuras y verticales que presumiblemente sirven como camuflaje, un puñado de especies de cada uno de los tres lagos de África oriental muestra también bandas horizontales. Este mosaico tan variopinto se da sobre todo en los peces de aguas abiertas, que suelen ser veloces nadadores y depredadores, posiblemente porque las franjas horizontales ayudan a disimular su silueta ante la mirada de las presas vigilantes.

MOTORES DE INNOVACIÓN

La aparente contradicción entre la diversificación vertiginosa y la reiterada aparición de adaptaciones ultraespecializadas en los cíclidos suscita varios interrogantes importantes. El primero concierne a la especialización trófica. La adopción de una dieta muy particular suele conllevar riesgos para el especialista, que puede caer en apuros si algo no marcha bien con la fuente de sustento. ¿Cómo han logrado los cíclidos evitar ese problema? La respuesta parece radicar en un rasgo anatómico insólito en los peces de agua dulce. Los cíclidos poseen el par de mandíbulas de la boca y otro par alojado en la garganta, como el horripilante alienígena de la película *Alien*. El alimento es triturado primero por las mandíbulas bucales y, acto seguido, por las gulares. Los peces emplean las primeras para un tipo de alimentos y las segundas para otros, lo que les confiere una enorme versatilidad. De este modo novedoso, pueden especializarse en explotar un recurso sin tener que renunciar al generalismo, no sea que su bocado predilecto se agote o encuentren una opción mejor.

Las mandíbulas gulares explican la manera en que los cíclidos han mitigado el riesgo que entraña la especialización, pero ¿cuál ha sido la fuente de toda esta innovación evolutiva? ¿Qué factores llevaron a la rápida mutación de los genes que codifican tales rasgos? ¿Y cómo han surgido las mismas adaptaciones en linajes independientes? El reciente desarrollo de los métodos de secuenciación genómica en el campo de las ciencias de la salud nos ha permitido a un grupo de expertos (un consorcio formado por más de 70 investigadores de laboratorios de todo el mundo y coordinado por el Instituto Broad de Cambridge, Massachusetts) comenzar a indagar en estas cuestiones para resolver el enigma del éxito asombroso de los cíclidos. El año pasado describimos la secuencia entera de varios genomas de cíclidos. Ahora contamos con las secuencias completas de cinco especies africanas y las secuencias parciales de 60 individuos representativos de seis especies muy afines del lago Victoria. La comparación de estos genomas entre sí y con los de otros parientes cercanos, los espinosos (una familia mucho menos diversa), ha permitido descubrir peculiaridades del genoma de los cíclidos que ayudan a entender la diversidad del grupo.

Entre los primeros aspectos investigados por el consorcio figuran las mutaciones que provocan cambios en los aminoácidos de las proteínas. Las proteínas dirigen la mayoría de las funciones en la célula y muchos genes especifican la secuencia de aminoácidos que deben ensamblarse para fabricar cada una de ellas. El exceso de proteínas con aminoácidos alterados indicaría que los genes con esas mutaciones han sufrido una fuerte presión selectiva y han evolucionado con celeridad; es decir, bajo determinadas circunstancias, los peces que adquirieron ciertos cambios de aminoácidos gozaron de una gran ventaja en cuanto a supervivencia o reproducción. Se ha comprobado que incluso el ADN de la especie de tilapia que secuenciamos, un cíclido evolutivamente anodino si se compara con sus primos, contiene muchas más mutaciones que el genoma de los espinosos.

INNOVACIÓN CLAVE



El secreto del éxito: dos juegos de mandíbulas

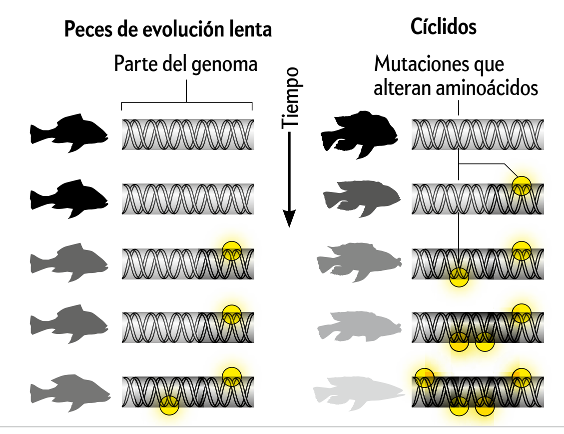
Todos los cíclidos poseen mandíbulas bucales, pero esgrimen además un segundo juego, las mandíbulas gulares. El alimento ingerido es triturado por ambas. Esa duplicación permite adaptar las mandíbulas ordinarias a una fuente de alimento, como algas o escamas de otros peces, sin riesgo de que la especie dependa solo de ese recurso, que algún día podría agotarse.

Pistas aportadas por el genoma

La reciente secuenciación y análisis del genoma de varios cíclidos africanos ha desvelado varios mecanismos que podrían explicar su rápida diversificación en miles de formas. Algunos de ellos también podrían ayudar a explicar otro aspecto misterioso de este grupo de peces: el grado extremo de evolución paralela, en que los mismos rasgos especializados aparecen una y otra vez.

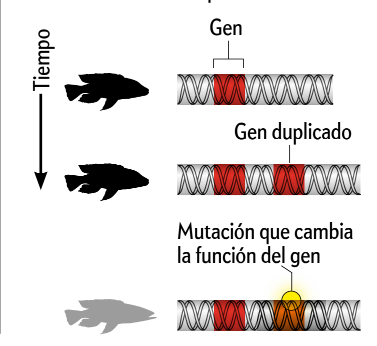
Mutaciones numerosas

El sinfín de mutaciones (*amarillo*) que provocan alteraciones en los aminoácidos de las proteínas sugiere que los genes con esas mutaciones están sometidos a una intensa presión selectiva que los hace evolucionar con rapidez.



Duplicación génica

Los genomas de los cíclidos presentan una alta tasa de duplicación génica, causada por errores en la replicación del ADN que producen múltiples copias de los genes. Las copias de más pueden cambiar de función sin perjudicar a los peces y pueden facilitar así la adaptación al entorno.



Y los cíclidos de los grupos hiperdiversos de los lagos Malawi y Victoria presentan tasas de mutación varias veces superiores a las de esta tilapia. No es nada extraño que muchos de los genes afectados intervengan en el desarrollo de las mandíbulas, dada la gama de adaptaciones tróficas de la que hacen gala los cíclidos. Así pues, uno de los mecanismos que ha acelerado la especialización de los tejidos es la intensa presión selectiva que actúa sobre múltiples genes.

Pero los genes por sí solos también pueden ser muy poderosos. Mi laboratorio ha hallado pruebas de que la orientación de las franjas corporales en los cíclidos depende de un único gen. Los genes que por sí solos causan grandes diferencias en el aspecto de los seres vivos, como los que codifican las franjas, podrían ayudar a explicar la enorme abundancia de cíclidos.

También estábamos deseosos por estudiar los genomas de los cíclidos en busca de genes con múltiples copias. Desde hace décadas se sabe que la duplicación génica (fruto de errores en la replicación del ADN) es uno de los principales mecanismos rápidos de diversificación de un gen. En síntesis, si este se duplica, la nueva copia puede mutar sin privar al animal del material codificado por el gen (porque la otra copia sigue funcionando), y el cambio podría facilitar la adaptación al entorno. Normalmente, hay muy pocas mutaciones génicas que no perjudiquen al «anfitrión». Los análisis genómicos demuestran que la velocidad de duplicación génica de los cíclidos es hasta cinco veces mayor que la de otros peces, como los espinosos.

Un tercer tipo de mecanismo genómico que analizamos fue la actividad de los llamados transposones, o «genes saltarines». Entre el 16 y el 19 por ciento del genoma de un pez corriente está formado por tales secuencias de ADN, que no cumplen una función evidente pero hacen copias de sí mismas y saltan de un lugar a otro del genoma. Pueden actuar como impulsores de la evolución si se insertan lo bastante cerca de un gen como para cambiar su función. En el genoma de los cíclidos se han hallado signos reveladores de varios períodos de rápida acumulación de transposones, uno de los cuales coincidió con la radiación del lago Victoria. La cronología indica que los transposones habrían facilitado la diversificación de los cíclidos en esos episodios.

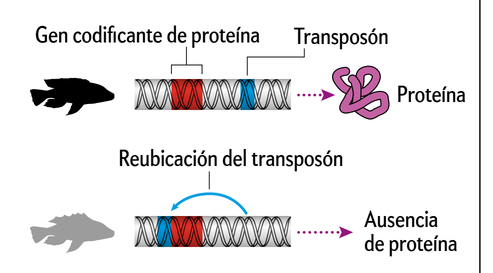
También hemos examinado otras secuencias de ADN que no suelen cambiar mucho. Ciertas regiones del genoma que no codifican los aminoácidos de las proteínas suelen permanecer muy conservadas durante dilatados períodos evolutivos. Estos elementos no codificantes conservados (CNE, por sus siglas en inglés) probablemente influyen en el funcionamiento de los genes. De no ser así, las mutaciones aleatorias se acumularían, como lo hacen con el tiempo en las regiones no conservadas, y esas regiones devendrían distintas entre una especie y otra. Los cíclidos comparten algunos CNE entre sí y con otras especies de parentesco más lejano, como los espinosos. Pero cuando examinamos con más detenimiento su ADN, descubrimos que, a pesar de que los CNE de los cíclidos eran lo bastante similares dentro de la familia como para ser reconocibles, estos habían cambiado más de lo esperado. La comparación de los genomas de los cíclidos reveló que cerca del 60 por ciento de los CNE habían sufrido cambios notables en algunos linajes. Este porcentaje sorprendentemente alto hace pensar que los genes con los que se vinculan podrían haber cambiado de función. Experimentos posteriores han confirmado tal presentimiento: el análisis de la función de los CNE conservados y alterados de los cíclidos mediante su inserción en el genoma de peces cebra ha revelado que uno y otro tipo de CNE activan los genes asociados a ellos de modo distinto, un indicio cierto de que la evolución de estos elementos conservados propició cambios de la función génica en los cíclidos.

Otro tipo de material genético que suele hallarse muy conservado en las especies son los microARN. Se trata de pequeñas moléculas que actúan como interruptores de genes, ya que indican a estos dónde y cuándo deben funcionar. Nos sorprendió descubrir cuarenta de ellos que eran inéditos en otros peces. A continuación, estudiamos embriones de cíclidos para determinar el lugar del organismo donde regulaban la actividad génica. Resulta que los microARN actúan con gran especificidad en genes de tejidos concretos, como puede ser una región particular del esqueleto facial. Esa actividad tan focalizada induce a pensar en los microARN como posibles artífices del cincelado primoroso que ha dado origen a las especializaciones tróficas de los cíclidos, entre otros rasgos.

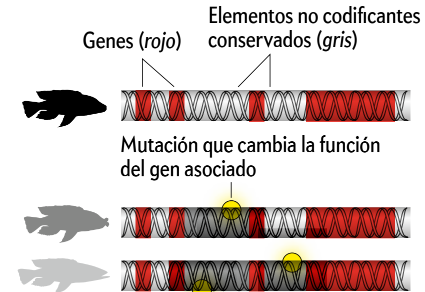
Se está muy lejos de saber si los cientos de microARN insertos en los genomas de los cíclidos fomentan el cambio evolutivo, pero son unos buenos candidatos para desempeñar ese papel.

JEN CHRISTIANSEN

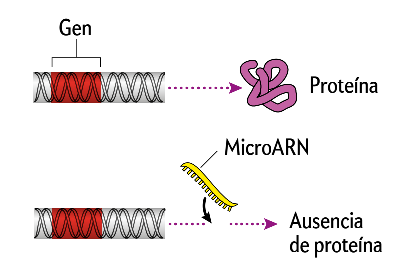
Transposones
Las secuencias de ADN que hacen copias de sí mismas y saltan a nuevas posiciones del genoma se denominan transposones. Según el lugar donde van a parar, pueden cambiar la función de un gen cercano que codifica una proteína. Los cíclidos han experimentado varios períodos en que los transposones se acumularon con rapidez, fenómeno que posiblemente aceleró su evolución.



Mutaciones del ADN que no suelen causar cambios
Algunas regiones del genoma que no codifican proteínas suelen permanecer muy conservadas a lo largo del tiempo, probablemente porque afectan a la función de los genes. Los cíclidos presentan más mutaciones de lo esperado en algunas de esas regiones, con una pauta que indica un posible cambio de función en los genes involucrados.



MicroARN nuevos
Pequeños fragmentos de material genético llamados microARN, que pueden impedir que ciertos genes produzcan proteínas, también tienden a conservarse. Los cíclicos poseen más microARN nuevos que ningún otro grupo de peces. Con su capacidad para controlar los genes en tejidos específicos, estos microARN tal vez contribuyeron al cincelado primoroso que dio origen a las especializaciones tróficas de los cíclidos.



Al impedir que los genes se activen en el lugar o en el momento equivocados, los microARN fomentarían a la par la variación y la precisión en el complejo baile de genes necesario para crear los dientes, mandíbulas, libreas y rituales de cortejo ligeramente distintos, entre otros rasgos, una variación que es la base de la adaptación y la especiación.

LO VIEJO ES NUEVO

Esta primera incursión en los genomas de los cíclidos sugiere que las nuevas mutaciones aleatorias, como las observadas en los CNE y las que originan nuevos microARN, ocupan un lugar destacado en la extraordinaria evolución de esta familia de peces. Pero sospechamos que la variabilidad genética más antigua, como la de los genes duplicados y los transposones, habría hecho gran parte del trabajo. Estas variantes permanecen latentes en el genoma hasta que surgen nuevas oportunidades ecológicas (como las que se dieron cuando los primitivos cíclidos fluviales colonizaron los lagos africanos) y confieren de repente una ventaja. La selección natural habría creado especies adaptadas a los nuevos hábitats aprovechando la antigua variabilidad genética.

Creemos que la clave radica en la variabilidad ancestral, porque el genoma de estas especies de cíclidos no muestra grandes diferencias genéticas fijas. Es decir, hay muy pocas variantes de un mismo gen que estén presentes en todos los miembros de la especie. En lugar de ello, el acervo génico de la especie conserva antiguas variantes tras la separación de la rama de sus antepasados. Y la joven especie no solo conserva el ADN heredado de ellos, sino que sigue siendo lo bastante similar como para cruzarse con especies muy cercanas y engendrar híbridos. Tal mezcla permitiría que las nuevas variantes génicas franquearan los límites específicos, lo que aportaría más material genético potencialmente útil que, en caso necesario, podría ser reciclado. La conservación de la antigua variabilidad genética, además de espolear la rápida diversificación de los cíclidos, también explicaría la aparición reiterada de los mismos caracteres ultraespecíficos en varios linajes distintos. Sospechamos que rasgos como las mandíbulas asimétricas y los labios gruesos no habrían surgido de nuevo en cada ocasión, sino que serían el resultado de la activación de los mismos genes e interruptores génicos una y otra vez. Esta hipótesis resta pendiente de validar.

Los mecanismos genómicos descritos no han sido los únicos impulsores de la evolución de los cíclidos. Sin duda, los factores ambientales han desempeñado un papel fundamental en las pautas y el ritmo de diversificación del grupo. La distinta magnitud de la diversificación observada en las diferentes radiaciones de los cíclidos en todo el mundo sustentan esta suposición: en África y en Nicaragua, las radiaciones ocurridas en los lagos con hábitats más complejos (con más nichos ecológicos) han dado origen a más especies que las acaecidas en los lagos de hábitats más homogéneos. Además de la especiación asociada a las nuevas adaptaciones tróficas para ocupar esos nichos, han aparecido variaciones cromáticas en la piel y las hembras han desarrollado preferencias por colores concretos.

Aún queda mucho por aprender. Pero ahora contamos con los genomas enteros y con las nuevas técnicas de análisis y nuestro conocimiento sin duda avanzará a pasos agigantados. Espero que el estudio de los mecanismos de especiación de los cíclidos siga acaparando interés. Pronto dispondremos de un conocimiento mucho más profundo del lenguaje del genoma y del ADN que tanto une como separa a los seres vivos. IyC

PARA SABER MÁS

The evolutionary genomics of cichlid fishes: Explosive speciation and adaptation in the postgenomic era. Frederico Henning y Axel Meyer en *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, vol. 15, págs. 417-441, agosto de 2014.
The genomic substrate for adaptive radiation in African cichlid fish. David Brawand et al. en *Nature*, vol. 513, págs. 375-381, 18 de septiembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Peces antárticos. Joseph T. Eastman y Arthur L. DeVries en *IyC*, enero de 1987.
Cíclidos de los lagos de África oriental. Melanie L. J. Stiassny y Axel Meyer en *IyC*, abril de 1999.
La regulación de la evolución. Sean B. Carroll, Benjamin Prud'homme y Nicolas Gompel en *IyC*, julio de 2008.
Peces cavernícolas. Aldemaro Romero en *IyC*, septiembre de 2011.

por Marc Boada Ferrer



Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

El arte de destilar

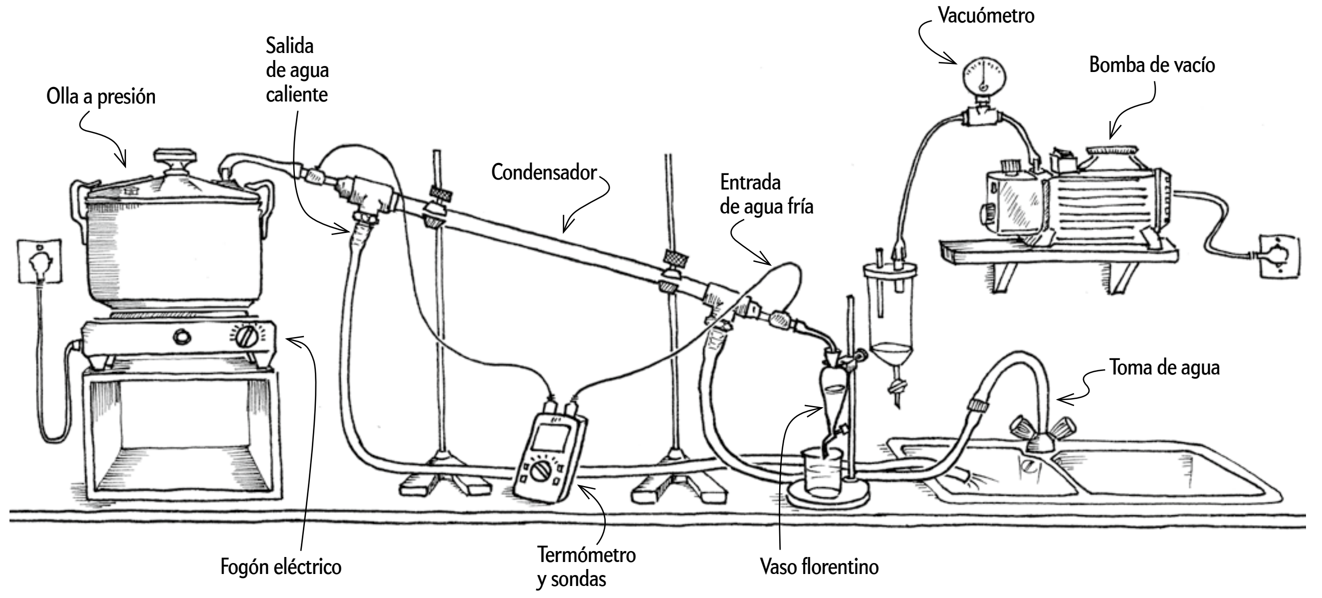
La destilación, una de las prácticas más antiguas de la química, sigue siendo un placer para los sentidos y un estimulante trabajo experimental

Se dice que el primer libro impreso dedicado a la destilación fue el *Liber de arte distillandi de simplicibus*. Debemos esta breve pero densa obra a Hieronymus Brunschwygk, quien la publicó en el año 1500. Pero la destilación no nació entonces; se sabe que fue utilizada en la antigua Babilonia y que los alquimistas chinos ya destilaban alcohol hace unos 2000 años. Quizá por ello, esta práctica que en la antigüedad fue revolucionaria podría hoy parecer simple y vetusta. Pero no nos engañemos: destilar sigue siendo esencial en muchísimos campos científicos, técnicos e incluso culinarios [*véase* «La destilación llega a la cocina», por Pere Castells; Investigación y Ciencia, junio de 2011]. No sería exagerado afirmar que nuestra civilización sería otra sin la destilación.

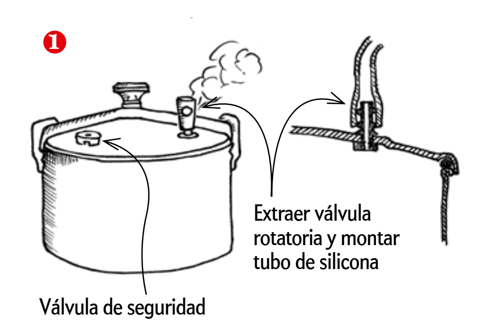
En el plano experimental, destilar constituye un estupendo ejercicio de destreza técnica, método y pulcritud. Además, rinde productos maravillosos: aromas florales, alcoholes, aceites esenciales, disolventes y muchos más. Por tanto, la técnica interesará a los aficionados a los procesos de extracción, a quienes disfruten elaborando perfumes o jabón casero y a los estudiantes que deseen realizar un buen trabajo en ciencias, por citar solo tres ejemplos.

Decía Brunschwygk que la destilación consiste en separar «lo tosco y lo sutil... lo material y lo inmaterial... lo agradable y lo desagradable». Ciertamente, algo de eso tiene. La destilación puede presentarse en distintas formas. La que aquí nos interesa es la que usa vapor como agente de extracción. La idea consiste en someter la sustancia original a un flujo continuo de vapor, el cual arrastrará los componentes más volátiles. Una vez cargado de sustancias, ese vapor se condensará en un serpentín refrigerado, lo que después nos permitirá recuperarlas. A continuación describiremos un montaje sencillo para la extracción de esencias vegetales. Como veremos, el experimentador deberá proceder con gran imaginación a la hora de resolver los pequeños detalles técnicos que surgirán para adaptar el diseño a sus necesidades.

El aparato propio para la destilación por arrastre de vapor es el alambique. Este consta de dos partes esenciales: la caldera y el serpentín. La primera es un volumen estanco donde introduciremos agua y la materia prima, sometiendo el conjunto a cierto calor. Para nuestro laboratorio casero, nada resultará más adecuado que una olla a presión. Este utensilio doméstico presenta dos grandes ventajas: permite un cierre totalmente hermético y dispone de agujeros por los que canalizar el vapor. Necesitaremos una olla con una capacidad de 4 o 5 litros como mínimo. Además, prestaremos atención a un par de aspectos de suma importancia: primero, jamás modificaremos la válvula de seguridad; y segundo, elegiremos una olla cuya válvula rotatoria (aquella por la que escapa el exceso de vapor cuando estamos cocinando) sea extraíble. Ello nos permitirá conectar el tubo que conducirá el vapor hacia el serpentín 1.



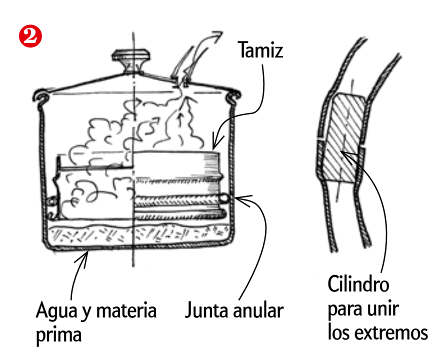
ESQUEMAS Y FOTOGRAFÍA CORTESÍA DEL AUTOR



El material para este tubo no es cosa baladí. Deberá soportar temperaturas muy próximas a la de ebullición y, además, ser estable químicamente. Los tubos de PVC se reblandecen y liberan olores, algo muy poco conveniente cuando pretendemos destilar aceites esenciales. Por ello merece la pena invertir unos euros en un buen tubo de silicona, con un diámetro interior de 6 u 8 milímetros y que se ajuste bien a la salida de vapor de la olla.

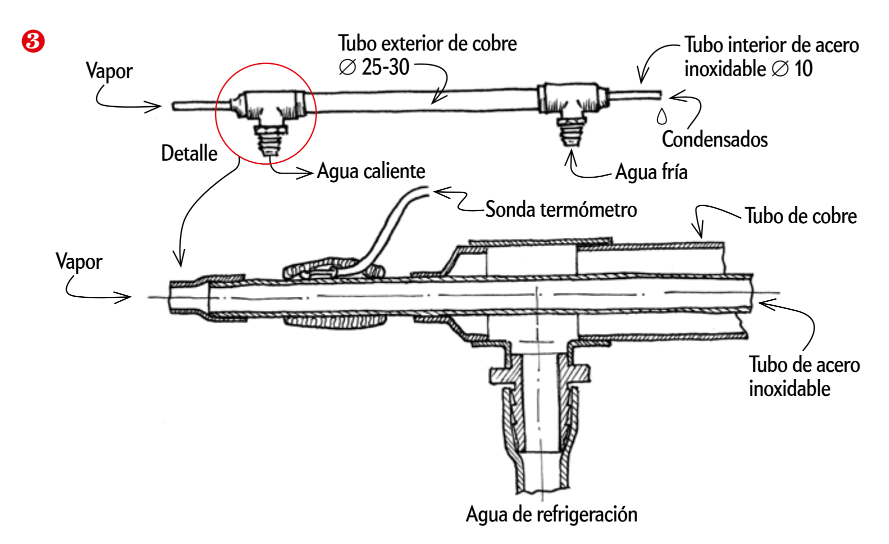
Nuestra caldera se complementará con un tamiz interior de acero inoxidable, de los mismos que usamos para tamizar harina. Una vez más, el material importa, y mucho. El aluminio y el hierro no sirven, ya que necesitamos un material inerte que, sin contaminar, resista la agresividad química de algunas esencias. Durante la realización del experimento, el tamiz se colocará en el interior de la olla, sobre la materia prima e invertido con respecto a su posición original. Será el encargado de retener las sustancias sólidas e impedir que lleguen al tubo de vapor. Deberá tener un diámetro algo menor que el del recipiente y, para ajustarlo bien a las paredes, emplearemos una junta de goma. Esta puede hacerse con tubo de silicona plegado en forma de anillo, el cual mantendremos cerrado gracias a un trozo de varilla de inoxidable que colocaremos en su interior ❷.

Toda caldera necesita un sistema de calefacción. El fogón de la cocina es perfecto, pero el tiempo que puede llegar a requerir una práctica de destilación tal vez haga preferible experimentar en el taller.



En tal caso podremos recurrir a un fogón eléctrico, de venta en ferreterías. El aquí representado es de 1200 vatios, con seis niveles de potencia. En diez o quince minutos pone en ebullición un par de litros de agua y, una vez a régimen, evapora medio litro en una media hora.

Es precisamente ese medio litro de agua en forma de vapor el que habremos de condensar en nuestro serpentín. Puede que este término nos traiga a la cabeza un largo tubo de cobre con forma de espiral y sumergido en un barreño de agua fría. Olvidémoslo. Hoy disponemos de agua corriente en casa, por lo que podremos optar por un diseño mucho más compacto: el condensador de camisa de agua.



Para construirlo necesitaremos un tubo metálico, por el que circulará el vapor, y otro de mayor diámetro que lo envolverá y por el que correrá un flujo continuo de agua refrigerante. Dejemos de lado también el cobre, al menos para el tubo del vapor. Aunque este metal se ha utilizado tradicionalmente en la destilación de alcoholes, en general no ofrece buenos resultados. Algunas esencias como el aceite de menta lo atacan, lo que produce compuestos metálicos que arruinan la transparencia y, por supuesto, la calidad del resultado, como pudo comprobar este experimentador tras arduas horas de purificación.

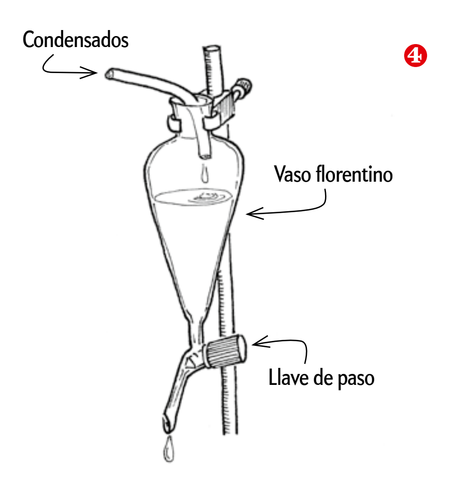
Para una caldera de 4 o 5 litros y el fogón que comentábamos, necesitaremos un condensador de 60 o 70 centímetros de largo. Resulta óptimo un tubo de inoxidable de 8 milímetros de diámetro interior y 10 de diámetro exterior. La camisa de agua se conforma con otro tubo de entre 25 y 30 milímetros de diámetro, el cual sí podrá ser de cobre, ya que jamás entrará en contacto con los destilados. La unión entre ambos se realiza mediante dos «T» y algunas reducciones que encontraremos en cualquier fontanería. Recordemos que el inoxidable puede soldarse con la aleación típica de estaño y plomo, mejor aún si contiene algo de plata ❸.

El dibujo muestra cómo conectar el tubo de refrigeración a la «T» del condensador. El agua de refrigeración puede obtenerse del grifo mediante un tubo de goma y reconducirse después hasta la pila con otro tubo (*véase el esquema general*). Solo debemos tener presente que el agua debe circular en sentido contrario al vapor, ya que la contracorriente garantiza una mejor transferencia de calor. En nuestro caso bastarán 3 litros de agua fresca por minuto para condensar y enfriar todo el vapor producido a la máxima potencia del fogón eléctrico.

Ahora uniremos la caldera y el condensador mediante el tubo de silicona. En el extremo opuesto del tubo de inoxidable insertaremos otro tubo de silicona, el cual embocaremos a un recipiente en el que se acumularán los condensados, el producto de la destilación.

Cualquier recipiente bien limpio servirá, pero el problema será recuperar los productos de destilación. Expliquémonos. Al destilar obtenemos dos sustancias básicas: agua condensada en grandes cantidades (el agua floral) y una segunda partida, muchísimo más exigua, de aceites esenciales. Si tan solo hemos destilado unos cientos de gramos de flores, hojas o cortezas de fruta, los óleos aromáticos formarán una película delgadísima sobre el agua floral. ¿Cómo recuperarlos?

Una posibilidad consiste en usar una jeringuilla y succionar con delicadeza. Sin



embargo, en cada trasiego una parte se emulsiona y se pega a las paredes de los recipientes, por lo que los microlitros que con tanto esfuerzo hemos destilado desaparecerán ante nuestros ojos. Para evitarlo se imponen dos medidas: destilar partidas relativamente grandes y adquirir un vaso de destilación, también llamado embudo de decantación o vaso florentino 4. Este consiste en un recipiente cónico con una boca en la parte superior y una llave de paso en la inferior. En el alambique que aquí detallamos, el vaso cuenta con una capacidad de 100 centímetros cúbicos, algo reducida. El vaso florentino permite achicar el agua y conservar el aceite, acumulando así el producto de numerosas destilaciones y facilitando su manipulación.

Hasta aquí el equipo básico. Los entusiastas del trabajo científico agradecerán colocar sondas de termómetro en algunos puntos clave del montaje. Primero, en el tubo de salida de los condensados, que vigilaremos para que se mantenga a temperatura ambiente regulando el flujo de refrigeración. Para minimizar el consumo de agua, reduciremos suavemente el caudal mientras ese valor sea razonablemente bajo. También vale la pena medir la temperatura de salida del vapor. Nunca será de exactamente 100 °C, pero debería estar cerca. Si no ocurre así es porque la caldera tiene zonas frías a las que no llega el calor de la estufa. En tal caso, procederemos a aislar con lana de roca tanto la caldera (toda ella, para minimizar pérdidas) como el tubo de silicona que la comunica con el condensador.

Ahora busquemos alguna sustancia prometedora, ya sea por su aroma, porque disponemos de ella o por cualquier otra razón. Pero primero, una advertencia para evitar frustraciones: teniendo en cuenta que la mayoría de las plantas aromáticas no contienen más del 2 por ciento de sustancias esenciales, deberemos conseguir una buena cantidad de materia prima; en caso contrario, el producto de nuestros esfuerzos será casi invisible a simple vista. Y, por la misma razón, no debemos pensar que destilando una sola vez conseguiremos mucho.

Podemos extractar hoja seca o fresca. En cualquier caso, no conviene comprimir en exceso las hojas, ya que el vapor debe poder circular entre ellas con cierta libertad. Dado que la densidad aparente de las hojas deshidratadas es mucho menor que la de las frescas, en una caldera de 4 litros podremos hervir unos 100 gramos de hoja seca de menta, o unos 500 gramos o más de hoja fresca. Para obtener cantidades ponderables de aceite de menta (rico en mentol), necesitaremos un mínimo de 2 kilos de hoja seca. Esto implicará realizar unas 20 destilaciones, lo que nos obligará a pasar dos o tres días entre penetrantes vapores mentolados. Con hoja fresca el resultado es mejor. De 6 kilos de hojas y flores frescas de lavanda, este experimentador logró obtener unos espectaculares 5 centímetros cúbicos de aceite esencial. En cualquier caso, no nos asustemos. Recordemos que Marie Curie tuvo que manipular toneladas de minerales de uranio para conseguir unos miligramos de radio.

Para rematar el asunto de las materias primas, señalar que es posible experimentar con mucho más de lo que pensamos. Por nuestro alambique podrán pasar algunos kilos tanto de flores como de hojas de las plantas aromáticas por todos conocidas: romero, tomillo, lavanda, menta, hierbaluisa... Pero también frutos mediterráneos, cáscaras de limón, mandarina o naranja y, por supuesto, las hojas de numerosos árboles, como ciprés, pino, cedro y similares. Nuestro olfato nos orientará.



DETALLE del vaso florentino con aceites esenciales después de haber extraído el agua de condensación.

Ya podemos empezar a experimentar. Primero señalar que deberemos usar agua sin cloro (no es necesario que sea destilada). Pongamos un par de litros en nuestra caldera, una generosa capa de materia vegetal y, por último, el tamiz de harina con su junta de goma. Cerremos la olla a conciencia y conectemos el tubo de silicona que lleva al condensador. Ajustemos el vaso florentino al tubo de salida y pongamos en marcha la refrigeración primero y el fogón después.

El proceso debería ser lento, de forma que los vapores tuvieran tiempo de impregnar toda la masa vegetal. Una potencia de calefacción excesiva nunca es deseable, ya que puede elevar la temperatura de las paredes de la caldera y quemar las plantas. En tal caso aparece un olor característico, llamado «de alambique», que perjudica notablemente la calidad de la esencia. La solución perfecta consiste en calentar la caldera al baño maría.

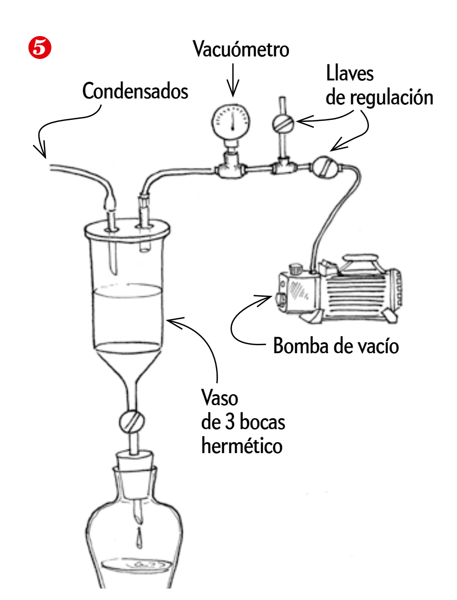
Al cabo de unos minutos, oiremos un suave burbujeo y veremos cómo los primeros vapores se condensan a la salida de la caldera, en el tubo de silicona. Poco a poco el vapor avanza, llega al condensador y, segundos más tarde, cae la primera gota. Semanas e incluso meses de preparativos culminan en ese momento. Expectante, el experimentador comprueba cómo a las primeras gotas sigue un pequeño hilo de agua turbia que empieza a acumularse en el vaso florentino. Este es un buen momento para controlar las temperaturas y regular la potencia del fogón. Un vaho excesivo sobre la superficie interior del vaso indica una refrigeración insuficiente o una potencia exagerada.

La destilación prosigue y, cuando el agua floral condensada comienza a acumularse, descubrimos una delgadísima película amarillenta flotando en la superficie y formando pequeñas gotas. Comprendemos ahora la fascinación que debieron sentir nuestros predecesores del Renacimiento. De unas simples hojas extraemos un aceite dorado, la esencia del vegetal.

Esa sustancia casi indetectable es el aceite esencial: una mezcla de compuestos volátiles, ésteres, alcoholes, hidrocarburos

y fenoles. Ahora el químico se convierte en un ser olfativo. Cada partida de material contiene una mezcla ligeramente distinta de ese amplísimo abanico de compuestos. Acerquemos la nariz a la boca del vaso de recolección: un intenso aroma nos impactará con fuerza. Aprenderemos a percibir detalles sutiles. Por ejemplo, un secado perfecto de la materia prima rinde aromas mucho más intensos y penetrantes que partidas en mal estado, recolectadas con un exceso de humedad y que se notan ligeramente «fétidas». Comprobamos así la importancia de todo el proceso, desde el cultivo hasta la destilación.

Antes de que el vaso florentino se haya llenado por completo, apagaremos el fogón y retiraremos los aislamientos térmicos de la caldera. Debemos vigilar que el vaso jamás rebose, ya que entonces perderemos todo lo obtenido. En un caso ideal, esos efluentes deberían reposar durante unas horas, ya que así se clarifican y las dos fases, el agua floral y el aceite, se separan mejor. Pero en ocasiones preferiremos sacrificar algo de minuciosidad en beneficio de la rapidez. Si, esperados unos minutos a que cese la ebullición, abrimos la caldera y renovamos la materia vegetal, podremos reanudar el proceso en mucho menos tiempo, ya que el conjunto aún se conservará caliente. Por supuesto, añadiremos agua para mantener un nivel



constante y, cada dos o tres ciclos, la renovaremos por completo.

Si perseveramos, el fruto es maravilloso: una pequeña cantidad de aceite esencial a la que podremos dar diversos destinos. El aceite de menta enfriado lentamente hasta un par de grados negativos precipita y produce mentol cristalizado. El aceite de lavanda dispersado en alcohol es uno de los perfumes más básicos, que además podremos aprovechar para mezclar con jabón. Y de las coníferas pueden extraerse sustancias de interés industrial, como el aguarrás.

Por último, podemos dar un paso más y destilar a baja presión. Para ello solo deberemos garantizar el hermetismo total del montaje e incluir un vaso de tres bocas antes del florentino. Conectado a este habrá una bomba de vacío —un compresor de nevera sirve—, un vacuómetro y algunos grifos que nos permitan controlar la presión 5.

Trabajar a baja presión no es fácil, pero permite algo realmente mágico: destilar muy por debajo de 100 °C. Recordemos que el agua solo hierve a 100 °C a una atmósfera de presión. A presiones menores, puede hacerlo a casi cualquier temperatura. Esta técnica resulta perfecta para destilar alcohol y otros disolventes volátiles, ya que, en un vacío parcial, estos se evaporan muchísimo más rápido que el agua, con lo que obtenemos condensados de gran concentración.

Llegados a este punto se abren nuevas líneas de experimentación. Nuestro destilador al vacío permite emular algunas de las producciones de la más alta cocina: ¿cómo, si no, podríamos hacer una sopa con sabor a humus? Sí, sí, nos referimos a los ácidos húmicos que impregnan la tierra del sotobosque. La única forma de extraer aromas delicadísimos que desaparecerían destilando a 100 °C es hacerlo precisamente así: con paciencia, método y la sabiduría química preservada durante siglos.

por Alejandro Pérez Carballo



Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.

¿Está cerca el final de la humanidad? (2)

Las extrañas consecuencias de aprender que existimos

En mi última columna consideramos un argumento cuya conclusión resultaba sorprendente: que, solo por aprender cuántas personas han nacido antes que usted, su nivel de creencia en que la humanidad se extinguirá pronto debería ser bastante mayor que su nivel de creencia en que nuestro fin aún tardará en llegar [*véase* «¿Está cerca el final de la humanidad?», por A. Pérez Carballo; Investigación y Ciencia, diciembre de 2015].

Recordemos brevemente lo que dedujimos entonces. Llamemos M al número de seres humanos que habrán existido una vez que la humanidad llegue a su fin, y m al número de seres humanos nacidos antes que usted. La hipótesis pesimista, H_p, es el enunciado según el cual m corresponde al 95 por ciento de M. Si H_p fuese verdadera, diríamos que el final de la humanidad ocurrirá «pronto», pues la gran mayoría de los seres humanos habría nacido ya. Por su parte, la hipótesis optimista, H_o, afirma que m tan solo representa el 5 por ciento de M. Si fuese cierta, querría decir que la inmensa mayoría de los seres humanos está aún por nacer.

Supongamos que la función de probabilidad P corresponde a su función de creencia antes de aprender cuánto vale m. En otras palabras, si X es un enunciado cualquiera, $P(X)$ nos dice qué nivel de creencia asigna usted a la posibilidad de que X sea cierto antes de saber cuántas personas nacieron antes que usted. Llamemos M_j al enunciado que afirma que el número total de seres humanos pasados y futuros es j, y, para cada $i \leq j$, llamemos E_i al enunciado que afirma que antes que usted han nacido i personas.

Con cifras concretas a modo de ejemplo, el argumento de la columna anterior nos permitía concluir lo siguiente. Supongamos que, antes de saber cuántos seres humanos han nacido hasta ahora, usted considera igual de probables los enunciados $M_{60\cdot 10^9}$ (que M valga 60.000 millones) y $M_{1{,}14\cdot 10^{12}}$ (que M valga 1,14 billones). Además, se halla convencido de que una de estas dos hipótesis es cierta, por lo que asigna a cada una de ellas un nivel de creencia de 0,5. Si ahora alguien le asegurase que antes que usted han nacido 57.000 millones de personas ($E_{57\cdot 10^9}$), su nivel de creencia en $M_{60\cdot 10^9}$ debería aumentar... ¡hasta 0,95!

La razón para llegar a esta conclusión era similar al argumento que nos dice que, por ejemplo, es más probable extraer el número 7 de una pila que contiene 10 boletos (numerados del 1 al 10) que de una que contiene 100 (numerados del 1 al 100). Sin embargo, no deja de resultar extraño que, solo por saber cuántas personas nacieron antes que usted, resulte posible extraer tales conclusiones sobre el tamaño total de la humanidad.



ISTOCKPHOTO/ARTPUPPY

Un argumento más general

Una respuesta natural es que nuestro razonamiento depende de algunos supuestos muy artificiales; en particular, de que las dos únicas hipótesis sobre el valor de M son $60\cdot 10^9$ y $1{,}14\cdot 10^{12}$. Sin embargo, no hace falta partir de dicho supuesto para llegar a la misma conclusión.

Para verlo, observemos primero que su nivel de creencia en el enunciado E_i (el que afirma que antes que usted han nacido i personas) bajo la hipótesis M_j (según la cual $M = j$) debería ser igual a $1/j$. Es decir, para todo $i \leq j$:

$$(1) \qquad P(E_i \mid M_j) = 1/j \,.$$

Ello se debe a que su posición exacta en la historia de la humanidad es, a efectos prácticos, aleatoria: dado el número total j de personas pasadas y futuras, no hay ninguna razón para pensar que sea más probable haber nacido en una posición que en otra.

Supongamos además que usted sabe que M ha de ser menor que un número K dado. K puede ser tan grande como deseemos: tal vez el número de átomos que existen en el universo multiplicado por el de segundos que pasarán antes de que el cosmos llegue a su fin según las estimaciones más optimistas de la física teórica. Da igual. Lo único importante es que M sea menor que algún número K. Este supuesto corresponde a la siguiente propiedad de nuestra función de creencia P:

$$(2) \quad P(M_1 \vee M_2 \vee \ldots \vee M_K) = \sum_{j=1}^{K} P(M_j) = 1 \,.$$

Por último, supongamos que, antes de aprender el valor de m, cada una de las hipótesis M_j con $j \leq K$ le resultan igualmente probables; es decir, que para todo $j, k \leq K$:

$$(3) \qquad P(M_j) = P(M_k) \,.$$

¿Qué sucede antes de aprender cuántos seres humanos han nacido antes que usted? Notemos primero que, antes de aprender E_i, la hipótesis optimista equivale al siguiente enunciado (donde, por simplicidad y sin pérdida de generalidad, supondremos que K es múltiplo de 20):

$$(E_1 \& M_{20}) \vee (E_2 \& M_{40}) \vee \ldots \vee (E_{K/20} \& M_K).$$

Por su parte, la hipótesis pesimista equivale a:

$$(E_{19} \& M_{20}) \vee (E_{38} \& M_{40}) \vee \ldots \vee (E_{19K/20} \& M_K) \,.$$

A partir de la definición de probabilidad condicionada y de los supuestos (1),

(2) y (3), es fácil demostrar que lo anterior implica que, antes de aprender E_i, su nivel de creencia en las hipótesis H_o y H_p debería ser el mismo.

Consideremos ahora qué ocurre al aprender que el número de personas que han nacido antes que usted es un i dado. Por conveniencia, fijemos los números $o = 20i$ y $p = 20i/19$, de modo que i corresponda al 5 por ciento de o y al 95 por ciento de p, respectivamente. La fórmula de Bayes para probabilidades condicionadas nos permite demostrar que:

$$\frac{P(M_p|E_i)}{P(M_o|E_i)} = \frac{P(E_i|M_p)\,P(M_p)}{P(E_i|M_o)\,P(M_o)} = 19\,\frac{P(M_p)}{P(M_o)}\ ,$$

donde el factor 19 se debe a que hemos usado (1). Si ahora empleamos (3), tendremos que concluir que, al aprender E_i, su nivel de creencia en M_p debería ser 19 veces mayor que su nivel de creencia en M_o. Pero, una vez que hemos aprendido E_i, los enunciados M_p y H_p son equivalentes (y lo mismo para M_o y H_o). Así pues, y al igual que antes, deberá asignar a la hipótesis pesimista un nivel de creencia 19 veces mayor que a la optimista.

Usted también existe

Lo anterior nos lleva a pensar que quizás hayamos partido de alguna hipótesis errónea. De los supuestos (1), (2) y (3), la opción más popular tal vez consista en rechazar (3). La idea es la siguiente. Si bien parece razonable asignar el mismo nivel de creencia a cada uno de los enunciados M_j, dicha conclusión estaría pasando por alto un indicio obvio: a saber, que usted existe. Simplemente como consecuencia de esta observación, usted debería encontrar ciertas hipótesis sobre el valor de M más probables que otras.

Para ver por qué, considere que lo único que sabe por el momento es el valor de K. Y supongamos —lo que, sin duda, resulta bastante extraño— que disponemos de una función de probabilidad P^* correspondiente a la función de creencia que usted debería tener antes de aprender que existe. Aceptemos además que, para cada $j \le K$:

$$P^*(e\,|\,M_j) = j/K\ ,$$

donde e es el enunciado que afirma que usted existe. Esta última propiedad puede entenderse imaginando la situación como un reparto de números de lotería: dado que para toda la humanidad solo hay K «billetes» posibles, si nuestra especie llegara a su fin tras haber repartido j de esos billetes, la probabilidad de que usted exista antes de que la humanidad desaparezca vendrá dada por j/K.

La observación clave es que, si bien P^* satisface (3), de manera que para cada $j,k \le K$:

$$P^*(M_j) = P^*(M_k)\ ,$$

la función $P(X) = P^*(X\,|\,e)$, donde X es un enunciado cualquiera, no lo satisface.

Para verlo, tomemos un número i, fijemos de nuevo $p = 20i/19$ y $o = 20i$, y consideremos qué sucede con las hipótesis M_p y M_o al aprender e. Aplicando una vez más la fórmula de Bayes:

$$\frac{P^*(M_p|e)}{P^*(M_o|e)} = \frac{1}{19}\ .$$

Es decir, al aprender e (pero antes de aprender E_i) su nivel de creencia en M_o debería ser 19 veces mayor que su nivel de creencia en M_p. Esto último cambia por completo la situación. De hecho, ahora podemos demostrar que:

$$\frac{P^*(M_p|E_i\&e)}{P^*(M_o|E_i\&e)} = \frac{P^*(E_i|M_p\&e)\,P^*(M_p|e)}{P^*(E_i|M_o\&e)\,P^*(M_o|e)} = 19\,\frac{1}{19} = 1\ .$$

Por tanto, al aprender E_i después de haber aprendido e, sus niveles de creencia en M_p y M_o deberían ser idénticos. Y dado que, una vez que hemos aprendido E_i, M_p y M_o equivalen a H_p y H_o, sus niveles de creencia en la hipótesis pesimista y optimista también serán iguales.

Al igual que en el apartado anterior, resulta sencillo demostrar que nuestra función P^* satisface $P^*(H_o) = P^*(H_p)$ y $P^*(H_o\,|\,e) = P^*(H_p\,|\,e)$. Así pues, hemos dado con un análisis de la situación en el que la relación entre sus niveles de creencia en H_o y H_p permanece constante tanto al aprender e como al aprender E_i.

¿Hemos resuelto el problema?

Sin embargo, esta solución nos obliga a admitir supuestos aún más artificiales que los del primer argumento. En particular, que es posible preguntarnos por cuán probable es que existamos bajo varias hipótesis (lo que, a su vez, favorece ciertas hipótesis sobre el tamaño de M).

Para ver por qué esto resulta tan extraño, supongamos que los mayores expertos del mundo se encuentran divididos entre dos teorías, T_1 y T_2, sobre el final de la humanidad. Respetando la opinión de los científicos y reconociendo que hay dos escuelas, usted asigna el mismo nivel de creencia a T_1 y T_2. Supongamos además que no se conoce el número de seres humanos nacidos hasta ahora.

Imagine que mañana se anuncia el último gran hallazgo de la ciencia. Según dicho descubrimiento, la teoría T_1 implica que el número total de seres humanos habidos y por haber será de 60.000 millones; según T_2, esa cifra será de 1,14 billones. Si nuestro análisis fuese correcto, usted debería concluir que T_2 es mucho más probable que T_1, ¡sin necesidad de hacer ningún experimento!

Aceptar que nuestra sola existencia convierte en más probables aquellas teorías que postulan que M es grande resulta extraño. Pero también lo es admitir que, solo por aprender cuántas personas han nacido hasta ahora, debamos concluir que la humanidad se extinguirá pronto.

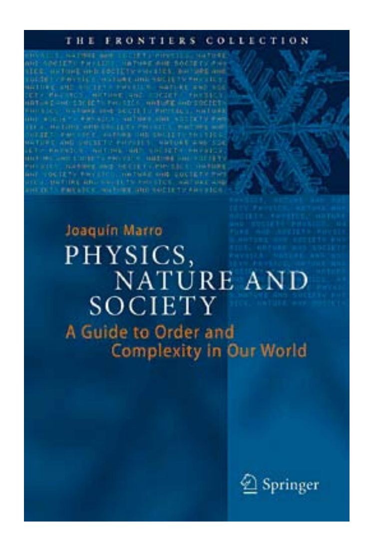
Ninguna de las dos posiciones que hemos considerado aquí parece tener más adherentes que la otra. Yo confieso no saber qué decir. Pero vale la pena mencionar que estas dos situaciones corresponden a los dos puntos de vista sobre el problema de la bella durmiente que analizamos hace unos meses [*véase* «El problema de la bella durmiente», por A. Pérez Carballo; Investigación y Ciencia, octubre de 2015]. Puede demostrarse que rechazar (3) corresponde al análisis según el cual, al despertar el lunes, su nivel de creencia en que la moneda cayó cara debería ser 1/3. De igual modo, aceptar (3) corresponde al punto de vista según el cual deberíamos asignar al mismo evento un nivel de creencia de 1/2. Por tanto, tal vez resolver el problema de la bella durmiente nos ayude a decidir qué deberíamos pensar sobre el final de la humanidad.

PARA SABER MÁS

Un análisis de las consecuencias de rechazar el supuesto (3) aparece en **No one knows the date or the hour: An unorthodox application of Rev. Bayes's theorem**, de Paul Bartha y Christopher Hitchcock (*Philosophy of Science*, vol. 66, págs. 339-353, septiembre de 1999). Para una discusión de este tipo de problemas y una crítica a la respuesta de Bartha y Hitchcock, merece la pena consultar **Anthropic bias: Observation selection effects in science and philosophy**, de Nick Bostrom (Routledge, 2002).

EN NUESTRO ARCHIVO

Thomas Bayes y las sutilezas de la estadística. Marc Dressler en *IyC*, julio de 2013.



PHYSICS, NATURE AND SOCIETY
A GUIDE TO ORDER AND COMPLEXITY IN OUR WORLD

Joaquín Marro. Springer International Publishing Switzerland, 2014.

Física, naturaleza y sociedad

Joaquín Marro nos guía a través del orden y la complejidad del mundo

Decía Epicuro en su *Carta a Heródoto* que «llegar a un conocimiento preciso de las cosas más importantes es la tarea de las ciencias naturales» (lo que entonces llamaban física) y, más todavía, que «nuestra felicidad depende de ello». De esto trata el libro del profesor de la Universidad de Granada Joaquín Marro, traducción corregida y aumentada de *Física y vida: De las relaciones entre física, naturaleza y sociedad* (Crítica, 2012), publicada por Springer. Traducción que, por otra parte, y por quitarme de en medio cuanto antes el mayor *pero* que le voy a poner al libro, es muy manifiestamente mejorable, cosa que creo que ha de ir al debe de la editorial.

Joaquín es un pionero de la física estadística. Iba a decir que en España, pero en realidad ha hecho contribuciones de nivel internacional, sobre todo en el campo de la física estadística fuera del equilibrio. Hizo su tesis en Barcelona en 1972 y, a continuación, con la primera beca Fulbright concedida en España, una segunda tesis en Nueva York. A su vuelta a España, establecido en Granada, comenzó a organizar los *Granada Seminar*, que han sido, junto con la escuela de Sitges que inició Pedro Garrido, inspiradores de la mayoría de la comunidad de física estadística española.

Con 25 ediciones del *Seminar* a sus espaldas y comenzando su carrera como profesor emérito, Joaquín nos trae en este libro su visión de la física tal y como muchos investigadores la entienden hoy: como esa ambiciosa física griega que busca respuestas a todo. Pero el libro es también, quizá deliberadamente, la historia del viaje personal del autor a través de los conceptos englobados bajo el epígrafe de «sistemas complejos». En este sentido, su propósito es guiarnos, a través de un camino más o menos intuitivo, fenomenológico y usando ejemplos, por los temas que la física estadística está abordando en los últimos años y que para él constituyen una extensión de la propia disciplina, todavía en construcción.

Por el libro desfilan los conceptos fundamentales sobre los que se basa la ciencia de los sistemas complejos: invariancia de escala, criticalidad, irreversibilidad, ruido, caos, universalidad y no linealidad. Lo hacen en un orden idiosincrásico, que a veces parece desorden pero que no está exento de propósito. La presentación es lo menos matemática posible. De hecho, la notación matemática es escasa y el énfasis se pone en la descripción de los problemas y sus conexiones.

Estamos a las puertas de una nueva física estadística, capaz de tratar problemas que ni por asomo parecía posible

La primera etapa del viaje es la que hacemos antes de salir: preparar el equipaje adecuado. Ese equipaje nos lo proporciona un repaso metodológico, somero pero no superficial, que ocupa el primer capítulo del libro y que nos sirve de presentación de esos conceptos básicos. Es también una declaración de intenciones más filosófica, en la que destaca el cierre del capítulo y la discusión de «ciencia frente a creencia», que pone las cosas en su sitio para lo que va a venir... que es mucho y muy variado, además de muy interesante.

En 180 páginas, Joaquín nos pasea por escenarios que van del tráfico de coches a la cooperación entre personas. Comienza el viaje por los autómatas celulares, sencillas concepciones abstractas que permiten ilustrar de manera fácil cómo reglas simples de interacción local dan lugar a comportamientos organizados del sistema como un todo, comportamientos que llamamos «emergentes». Es el caso del tráfico, donde aprendemos que los autómatas nos enseñan por qué muchas veces nos tropezamos con atascos sin causa aparente, con una fenomenología que adelanta el estudio de los fenómenos críticos. De ahí nos transportamos al ignoto mundo del caos y de la dinámica no lineal, de la que el mejor ejemplo es el comportamiento aparentemente errático de las poblaciones animales en los ecosistemas. Un comportamiento que, además, permite mostrar cómo la dinámica no lineal no es más que otra descripción de lo que nos enseñaban los autómatas.

Llegamos así a los fenómenos críticos, el estudio de las transiciones de fase, que estaba en los albores cuando Joaquín hacía su tesis y que es hoy una subdisciplina muy bien establecida. Prueba de ello es el concepto de universalidad, que tanto manejamos los físicos: para determinar las propiedades fundamentales de una transición de fase, solo es necesario conocer unas pocas cosas sobre el sistema de que se trate [*véase* «Problemas físicos con muchas escalas de longitud», por Kenneth Wilson; Investigación y Ciencia, octubre de 1979; *reeditado para* «Grandes ideas de la física», colección Temas de IyC, n.º 80, 2015]. El ejemplo en este caso es la transición de percolación y su relación con el estudio de los incendios forestales. No sorprendentemente, los autómatas —la descripción microscópica— sigue subyaciendo y apareciéndose para hablarnos de por qué unos incendios son catastróficos y otros no. Y esto nos deja en la siguiente etapa, donde nos encontramos con el ruido como provocador de orden o, al menos, de estructura. Un ruido especial, con propiedades peculia-

res y a pesar de ello ubicuo, que se manifiesta en el vuelo de los pájaros, en el crecimiento de dispositivos electrónicos y en la configuración de las macromoléculas orgánicas.

Pero la universalidad es un concepto tan potente que nos permite continuar el viaje hacia terrenos tan alejados de la física como el funcionamiento del cerebro o los comportamientos sociales. En realidad, la universalidad nos dice, como bien explica el autor, que en el fondo da igual de qué sistema se trate si sabemos cómo interaccionan sus componentes. Joaquín juega así en casa cuando nos resume la investigación que le ha ocupado en los últimos años sobre los modelos de cómo el cerebro reconoce patrones (con la colaboración inestimable del ruido).

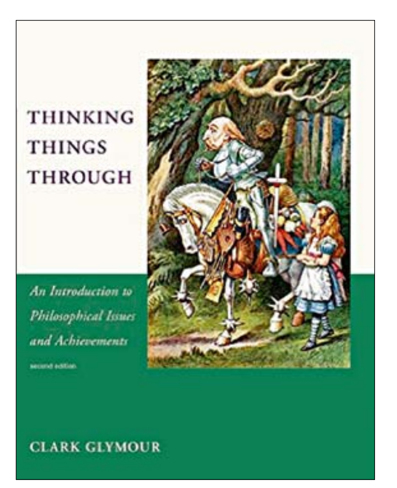
Y para terminar nuestro viaje nos deja en el complicado mundo de las interacciones humanas: estudiando a golpe de ideas físicas cómo y por qué cooperamos unos con otros, cómo se propagan las ideas y las culturas, o cómo los chicos listos de los mercados financieros se comportan tan gregariamente como las bandadas de pájaros o los rebaños de ovejas. Pondré aquí la otra pequeña pega que he encontrado, y es que, teniendo en España una de las comunidades más importantes de físicos heterodoxos, el libro tiene muy escasas referencias a sus trabajos, pese a ser de enorme relevancia internacional (a título de ejemplo, recomiendo el número relativamente reciente de la *Revista Española de Física*, que entonces dirigía Joaquín, sobre sistemas complejos socio-tecnológicos, donde el lector puede encontrar esa panorámica de lo que se hace en España).

Llegamos de esta manera al puerto al que nos guiaba Joaquín desde el principio: a la conclusión de que, aunque queda mucho por hacer, estamos a las puertas de una nueva física estadística, capaz de tratar problemas que ni por asomo parecía posible. Una nueva ciencia de la complejidad, en la que trabaja una comunidad cada vez más amplia y distribuida por todo el mundo, y que el autor ve paralela al período entre la física newtoniana y la elaboración de la teoría cuántica.

En su libro *Six degrees: The science of a connected age* (W. W. Norton & Company, 2003), el matemático aplicado y reconvertido en sociólogo Duncan J. Watts afirmaba: «Los físicos están perfectamente preparados para invadir otras disciplinas, ya que son extremadamente inteligentes pero también mucho menos quisquillosos con los problemas que eligen estudiar. [...] Por irritante que sea esta actitud, la llegada de los físicos a un área de investigación que la física no había tocado a menudo presagia un período de gran descubrimiento y excitación. [...] Nadie aterriza con tal furia y en tan gran número como un grupo de físicos hambrientos, adrenalinizados por el olor de un nuevo problema».

No podía terminar esta reseña con un mejor retrato del espíritu del libro, espíritu que el autor sigue transmitiendo a las nuevas generaciones de físicos. Gracias, Joaquín, y que sea por muchos años.

—Ángel Sánchez Sánchez
Grupo Interdisciplinar de Sistemas Complejos
Universidad Carlos III
Madrid



THINKING THINGS THROUGH
AN INTRODUCTION TO PHILOSOPHICAL ISSUES AND ACHIEVEMENTS

Clark Glymour. MIT Press; 2.ª edición, 2015.

Metaciencia

Raíces filosóficas de la investigación científica

Prueba, demostración, refutación, contrastación empírica, generalización, verdad, falsedad, probabilidad y causalidad pertenecen a esa gavilla de conceptos indisociables de cualquier investigación y de la ciencia resultante. Constituyen el núcleo de la metaciencia. En particular, causalidad y probabilidad son las dos ideas unificadoras del método científico moderno. El libro de referencia amplía ese horizonte y plantea la situación contemporánea de cuestiones centrales del pensamiento filosófico que se reflejan en lógica, estadística, teoría de la decisión, ciencia de la computación y ciencia de la cognición.

Lo que uno piensa sobre la estructura del mundo tiene mucho que ver con lo que piensa sobre cómo ha de proceder la investigación, y a la inversa. Todos esos temas implican, a su vez, reflexiones sobre la mente, pues es la mente la que conoce. Hay, en primer lugar, muchas cuestiones que no se abordan en física ni en psicología. ¿Cómo podemos conocer que existen partículas tan pequeñas que escapan a nuestra detección? ¿En qué consiste una explicación científica? ¿Cómo sabemos que el proceso de la ciencia nos lleva a la verdad, sea esta lo que sea? ¿Qué es la verdad? ¿Cómo sabemos que hay otras mentes? ¿Qué hechos determinan si una persona en un momento dado es la misma persona en otro momento del tiempo? ¿Cuáles son los límites del conocimiento? ¿Qué es una demostración o prueba?

La ciencia de la computación se creó con los resultados de más de 2000 años de empeño en responder a una cuestión sencilla: ¿en qué consiste una demostración o una prueba? Una rama de la estadística moderna, la estadística de Bayes, emergió en busca de una respuesta a la pregunta: ¿qué es una creencia racional? La teoría de la toma de decisiones racionales, nuclear en la economía moderna, tiene el mismo origen. La ciencia cognitiva moderna, que se propone estudiar la mente humana a través de experimentos y con el auxilio de modelos de ordenador, de la conducta y del pensamiento humanos, constituye el resultado de unir una tradición filosófica de especulación sobre la estructura de la mente con los frutos de

la inquisición filosófica sobre la naturaleza de la prueba.

Hay muchas formas de razonar, de argumentar. Unas más rigurosas y convincentes que otras. Los argumentos deductivos correctos muestran que, si las premisas son verdaderas, también lo será la conclusión. Son, además, argumentos válidos. El paradigma del razonamiento deductivo es la matemática. En ella se espejan los demás, con la garantía de que una conclusión será cierta si las premisas lo son. Además, la posibilidad de un razonamiento deductivo debe vincularse al lenguaje y a la estructura del mundo. El razonamiento deductivo se aplica en todo tipo de ciencia natural, en todo tipo de ciencia social y en todo tipo de ciencia aplicada.

Hay formas de razonamiento distintas del deductivo. A veces habrá que aceptar una conclusión porque se presenta como la mejor explicación posible de un fenómeno dado; en otras ocasiones deberemos admitir la conclusión que ofrece una analogía con algo que sabemos que es cierto; otras, nos apoyaremos en muestreos estadísticos de grandes poblaciones. A todas esas formas de razonamiento las llamamos inductivas. En un razonamiento inductivo, las premisas, o supuestos, no implican necesariamente la conclusión. A lo largo de 2500 años, la filosofía ha buscado respuesta a las preguntas sobre cómo podemos determinar si un razonamiento que procede de ciertas premisas y llega a una conclusión es un argumento válido; cómo podemos establecer si una conclusión viene necesariamente exigida por un determinado conjunto de premisas; y qué rasgos de la estructura del mundo, de la estructura del lenguaje y de la relación entre palabras, pensamientos y cosas hacen posible un razonamiento.

Todo empezó, sistemáticamente, con Aristóteles (384-322 a.C.). Pero ¿qué conocía Aristóteles? ¿En qué situación se encontraba el saber en torno al año 400 a.C.? Se dominaban ciertas artes prácticas: forja, carpintería, cantería, manufactura textil, elaboración de tintes, ganadería, pesca y agricultura, así como principios de navegación, arquitectura e ingeniería. Se manejaba la geometría y la teoría de números. Se explotaban leyes de la mecánica y la hidráulica, aunque la astronomía era la rama más desarrollada de las ciencias físicas. Una astronomía de las posiciones de las estrellas, los planetas y el Sol, basada en la observación directa, sin aparatos o con instrumentos muy simples, ciencia necesaria para la navegación y la religión, avanzó de la mano de la geometría. Se difundieron conocimientos de biología y medicina. Se avanzaron teorías sobre la estructura del universo y de la propia materia.

En ese marco, Aristóteles desarrolló un sistema ético, una ciencia de la biología, una cosmología, una dinámica y una teoría de la constitución de la materia. Aristóteles produjo también algo que resultó ser más importante que las aportaciones científicas: un método de investigación científica. Describió la naturaleza de la explicación científica, la demostración, la fundamentación empírica y la prueba. La lógica de Aristóteles atañe a sentencias, enunciados que tienen una estructura simple que consta de un cuantificador, un sujeto y un predicado. La forma característica de inferencia en la lógica aristotélica es el silogismo, que consta de un par de enunciados o premisas y un tercer enunciado que es la conclusión.

¿En qué consiste la explicación científica? ¿Cómo sabemos que el proceso de la ciencia nos lleva a la verdad?

Aristóteles fue superado en sus aportaciones científicas. En torno al año 100 d.C., Claudio Ptolomeo desarrolló una teoría sobre el movimiento de los planetas mucho más detallada y precisa. Ptolomeo contribuyó a la óptica, rama en la que destacaron de manera especial los científicos medievales. Arquímedes aportó contribuciones a la física que resistieron el paso del tiempo. Los eruditos medievales desarrollaron una teoría del movimiento que mejoraba la aristotélica. Pese a tales limitaciones, la concepción aristotélica del método científico perduró hasta el siglo XVIII. La ciencia, en su mente, ha de constituir un sistema de enunciados de conocimiento. Los enunciados fundamentales, o axiomas, se emplean para deducir enunciados menos fundamentales. La explicación científica de un fenómeno general del mundo consiste en un argumento válido que presenta una descripción de ese fenómeno general como su conclusión y que posee enunciados fundamentales verdaderos como premisas. Cada ciencia tiene su propio sistema axiomático.

Aristóteles fue discípulo de Platón (428-348 a.C.). Ambos compartieron la misma idea sobre la estructura lógica del conocimiento. A Platón le importa la naturaleza de las cosas; su cuestión paradigmática: ¿qué es X?, donde X podría simbolizar un rasgo moral, un individuo, un objeto material o una entidad matemática. Los *Diálogos* planteaban ese tipo de cuestiones; qué sea la virtud es el asunto tratado en el *Menón*, por ejemplo. Para Platón, la experiencia no aportaba la certeza que se requiere en el conocimiento, por muy atenta que sea la observación. Todo lo que conocemos ya lo conocíamos; lo que a veces reputamos aprendizaje de la experiencia no es más que un proceso de reconocimiento, de rememoración. Para Platón, el ejemplo más claro de conocimiento es el que nos ofrecen la geometría y la relación entre los números.

Un primer ejemplo sólido de prueba matemática nos lo ofrece Euclides (ca. 325 a.C.-265 a.C.). En sus *Elementos,* Euclides desarrolló la geometría como un sistema axiomático. Tras una secuencia de definiciones, expone una serie de supuestos, algunos de los cuales carecen de relación con la geometría (las «nociones comunes»), en tanto que otros sí encierran un contenido geométrico específico (los «postulados»). De las nociones comunes y de los postulados se deducen los teoremas de la geometría. Para Euclides, esos supuestos eran suficientes para urgir la necesidad, es decir, implicar, todas las verdades de la geometría. Entre las definiciones, recuérdense: punto es lo que no tiene partes, la línea consta solo de longitud, los extremos de las líneas son puntos, línea recta es la distancia más corta entre dos puntos, una superficie tiene longitud y anchura, y los extremos de una superficie son líneas. Entre las nociones comunes, mencionemos: dos cosas iguales a una tercera son iguales entre sí, si se añade lo mismo a dos cosas iguales el resultado es otra igualdad, si se sustrae lo mismo a dos cosas iguales el resto es otra igualdad, o el todo es mayor que la parte. Entre los postulados, citemos: se puede trazar siempre una línea recta entre dos puntos, podemos dibujar un círculo con cualquier centro y radio, todos los ángulos rectos son iguales entre sí, etcétera.

Las paradojas dificultan la argumentación demostrativa. Las paradojas sobre el

infinito, por ejemplo, se remontan a Zenón de Elea, del siglo v antes de nuestra era. Algunas de las paradojas de Zenón no se resolvieron hasta que las abordaron los matemáticos del siglo xix. En cada caso, la paradoja se ofrece como prueba de algo absurdo. La paradoja de Aquiles y la tortuga es muy sencilla. Ambos se proponen echar una carrera. La tortuga avanza con una velocidad v y se conviene en que Aquiles inicie su carrera cuando la tortuga haya recorrido cierta distancia, d. Para alcanzar a la tortuga, Aquiles debe recorrer primero la distancia d, lo que requerirá un tiempo $t(d)$. Pero, en ese tiempo, la tortuga habrá andado una distancia $v \times t(d)$. Para alcanzar ahora a la tortuga, deberá Aquiles avanzar la distancia extra $v \times t(d)$. Entretanto, la tortuga habrá recorrido una distancia $v \times t(v \times t(d))$. Si proseguimos de ese modo, nunca llegará el momento en que Aquiles alcance a la tortuga.

El argumento de Zenón parece una prueba deductiva. Pero, puesto que la conclusión es falsa, sabemos que, o bien los supuestos del argumento son falsos, o bien debe haber una falacia escondida en el argumento. Existe una secuencia infinita de intervalos temporales en la que cada uno representa el tiempo que tarda Aquiles en llegar desde el punto en que se encuentra hasta el punto en que en ese mismo momento se halla la tortuga. Zenón concluye, a partir de ello, que Aquiles no podrá nunca alcanzar a la tortuga, y ahí es donde se esconde la falacia. Hoy estamos familiarizados con secuencias infinitas de cantidades positivas que suman una cantidad finita. La expansión decimal de la fracción 1/3, por ejemplo, es igual a 0,3 + 0,03 + 0,003 + 0,0003 + ..., donde la secuencia continúa hasta el infinito. Con la ayuda de la matemática moderna, diríamos que la secuencia de distancias entre Aquiles y la tortuga tiende a cero y que la suma de la secuencia de intervalos temporales converge a un número finito. Esa suma, cualquiera que sea, representa el tiempo requerido por Aquiles para alcanzar a la tortuga.

¿Puede un infinito ser mayor que otro? En el siglo xix la cuestión desencadenó un torrente de lucubraciones. Decimos que un conjunto es mayor que otro cuando comparamos ambos elemento a elemento y uno consta de un número de elementos mayor que el otro. El conjunto K es mayor que el conjunto L si y solo si no existe una relación uno a uno entre los miembros de L y los de K, y K tiene miembros sin correspondencia en L. Dos conjuntos tienen el mismo tamaño si el primero no es mayor que el segundo y el segundo no es mayor que el primero. Cuando ninguno es mayor que otro, decimos que poseen la misma cardinalidad. Dos conjuntos tienen la misma cardinalidad si y solo si existe una relación uno a uno entre ellos. Para conjuntos finitos, la noción de cardinal es nuestra noción de tamaño del conjunto.

Hacia finales del siglo xix surgían en Alemania una nueva lógica y nuevas concepciones de la prueba. Gottlob Frege (1848-1925) inventó una nueva aproximación a la matemática. Aritmética y geometría eran ciertas y podían ser conocidas solo por la razón porque la aritmética y la geometría se reducían a lógica, y la lógica es cierta y puede conocerse solo por la razón. De acuerdo con esa idea fregeana, conocida hoy por logicismo, las nociones de número, orden numérico, suma y producto pueden definirse en términos lógicos; con esas definiciones, las leyes básicas de la aritmética se tornan proposiciones lógicas que son necesariamente verdaderas.

La teoría lógica de Frege se fundaba en un análisis de la estructura lógica del lenguaje; su teoría de la prueba emplea solo aspectos gramaticales de las fórmulas en un lenguaje lógico. ¿Qué tipo de fórmulas? Las verdades lógicas: sentencias que son necesariamente verdaderas. Para ello, se requería una doctrina sobre el significado. El desarrollo de la misma llevaría a la teoría de modelos. Frege distinguía entre la referencia de una frase o sentencia y el sentido de la misma. Las frases «lucero del alba» y «estrella vespertina» se refieren al mismo objeto, el planeta Venus, pero tienen un sentido diferente. La referencia no determina el sentido, ni el sentido determina la referencia, pero dos expresiones que tengan el mismo sentido sí tendrán la misma referencia.

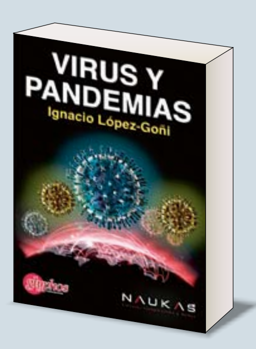
En el siglo xix aparecieron, asimismo, las geometrías no euclídeas. Carl Gauss, uno de los descubridores de la primera geometría no euclídea, la consideraba una teoría empírica alternativa sobre el espacio. Gauss se esforzó infructuosamente en realizar una prueba que determinase si el espacio era euclídeo o no. El programa logicista comenzado por Frege fue continuado en el siglo xx por Bertrand Russell y Alfred North Whitehead, partidarios de reducir también la geometría a la lógica. La teoría lógica de Frege incluía lo que hoy denominamos teoría de conjuntos. Según la formulara Frege, la teoría resultó inconsistente para Russell.

—Luis Alonso

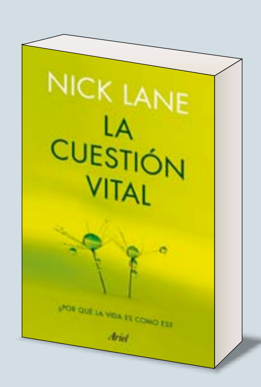
NOVEDADES



LAS MATEMÁTICAS DE LOS CRISTALES
Manuel de León y Ágata A. Timón
Colección *¿Qué sabemos de?*
CSIC y Catarata, 2015
ISBN: 978-84-00-09983-1
110 págs. (12 €)



VIRUS Y PANDEMIAS
Ignacio López-Goñi
Glyphos Publicaciones y Sello Editorial NAUKAS, 2015
ISBN: 978-84-943056-7-2
224 págs. (19,95 €)



LA CUESTIÓN VITAL
¿POR QUÉ LA VIDA ES COMO ES?
Nick Lane
Ariel, 2016
ISBN: 978-84-344-2306-0
416 págs. (22,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff


SCIENTIFIC AMERICAN

Marzo 1966

La carrera a la Luna

«Parece que la superficie lunar es muy sólida e, inesperadamente, muy poco radiactiva. Tales son los dos principales descubrimientos científicos resultantes del satisfactorio “alunizaje suave” de una astronave soviética el 3 de febrero. Según el académico Nikolai Barabashov, destacado selenólogo soviético, las fotografías del *Luna 9* “demostraron sin lugar a dudas que la capa superior del suelo lunar es una masa esponjosa, de textura áspera, salpicada de fragmentos dispersos de aristas vivas y de tamaños variados”. Parece haberse zanjado la antigua cuestión de si esa capa es lo bastante consistente como para soportar objetos pesados. Los operarios soviéticos encargados del análisis de las fotografías señalan que el conjunto instrumental de 100 kilogramos del *Luna 9* “no se hundió en el terreno de modo relevante”.»

El petróleo del mar del Norte

«El área de prospecciones petrolíferas y gasísticas más activa en el mundo es ahora el mar del Norte y sus cercanías. Un incentivo especial es la perspectiva de hallar grandes yacimientos de combustible en la inmediata proximidad a mercados muy importantes y en una región de relativa estabilidad política. En *Geographical Review*, Trevor M. Thomas señala que en el mar del Norte hay unos domos salíferos del tipo de los que forman la base estructural de gran parte de la bolsa petrolífera de la zona del golfo de México. Numerosas compañías han efectuado minuciosos reconocimientos magnéticos y sísmicos. Según Thomas, se trata de un trabajo sumamente especulativo, pero parece probable que se descubran yacimientos de gran valor.»


SCIENTIFIC AMERICAN

Marzo 1916

La aviación naval despega

«El hidroavión, como medio de reconocimiento de la Armada, debe ser capaz de operar teniendo como base un barco navegando con la misma independencia de la situación meteorológica que sus parientes los aviones del ejército. Gracias al trabajo inicial del capitán Washington I. Chambers, de la Armada de EE.UU., a bordo del *U.S.S. North Carolina* hay una catapulta de raíles de carrera corta instalada de modo permanente. Desde ella se han estado lanzando hidroaviones repetidamente durante las últimas semanas, en mar abierto y con el crucero acorazado singlando.»

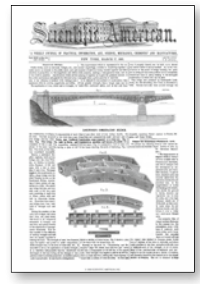
La furia de los elementos

«El período de tiempo borrascoso que se inició en los Países Bajos alrededor de Navidad estuvo marcado por un tremendo vendaval en la noche del 13 al 14 de enero. En aquella noche de pavor, el desastre que se abatió sobre la parte meridional de la provincia de Holanda del Norte fue el peor de los que se guarda recuerdo desde la terrible inundación de Santa Isabel en 1421, cuando se ahogaron 10.000 personas. El mérito de que esta vez las víctimas se cuenten solo por decenas debe atribuirse enteramente a las mejoras realizadas en la organización del socorro, en las carreteras, en las comunicaciones telegráficas y telefónicas y en el servicio ferroviario.»



LANZAMIENTO de un hidroavión desde un crucero estadounidense, 1916.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXIV, N.º 12, 18 DE MARZO DE 1916


Scientific American.

Marzo 1866

Alimentos contaminados

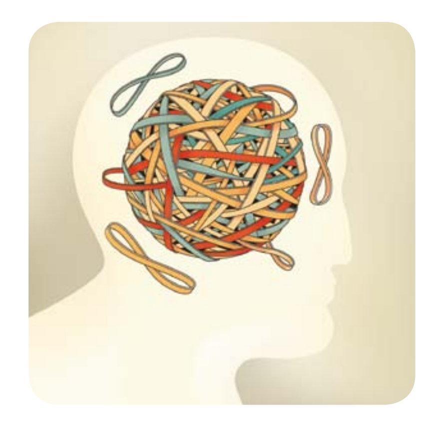
«La *Trichina spiralis* es un gusano microscópico o animálculo que se encuentra, en cantidades enormes, en los músculos e intestinos de varios animales, especialmente cerdos y conejos. Por la revista londinense *The Lancet* nos enteramos de que en Hedersleben (Sajonia prusiana) ese morbo ha causado más de noventa muertes. ¡Todo ese estrago debido a un cerdo triquinoso! El carnicero, al notar el aspecto anormal de la carne del animal, la disimuló cuidadosamente mezclándola con la carne de dos cerdos sanos. Así lo confesó poco antes de su muerte, causada por la triquinosis que le contagió su propia carne. Su esposa falleció también de esa enfermedad.

Períodos geológicos

«Las realidades de la geología tienden todas a indicar una antigüedad de la cual apenas estamos empezando a formarnos una vaga idea. Fijémonos, por ejemplo, en la sobradamente conocida creta. Esta se compone por entero de conchas y fragmentos de conchas depositadas en el fondo de un antiguo mar. Un proceso como ese debe ser muy lento; probablemente no exageraríamos al suponer que el espesor del depósito creció a razón de veinticinco centímetros por siglo. Ahora la creta tiene una altura de unos 300 metros, por lo que su formación habría tardado más de 120.000 años.»

NEUROCIENCIA
El poder del cerebro infantil
Takao K. Hensch

Conocer los períodos de aprendizaje intenso durante la infancia podría ayudar a corregir trastornos mentales en la edad adulta.

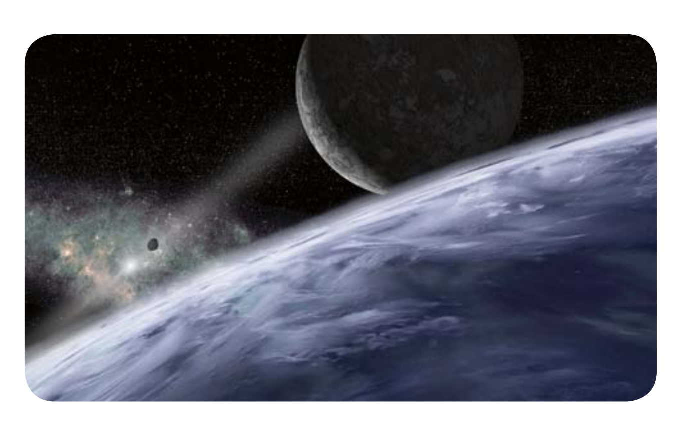


SOSTENIBILIDAD
Seis mil millones de africanos
Robert Engelman

¿Cómo hacer frente a la alarmante previsión de crecimiento demográfico en África? La solución: dotar a las mujeres de una mayor autonomía.

TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN
Manifiesto Digital
VV.AA.

En la era de los macrodatos, ¿nos hallamos ante la inminente automatización de la sociedad? Un llamamiento conjunto para garantizar la libertad y la democracia digital.



ASTRONOMÍA
En busca del Planeta X
Michael D. Lemonick

Cada vez más indicios apuntan a la existencia de un noveno planeta en los confines del sistema solar.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Robin Lloyd
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes y Las bellas durmientes de la ciencia*; Andrés Martínez: *Apuntes, La memoria mineral de las plantas y La vertiginosa evolución de los cíclidos*; Federico Fernández Gil: *El GPS del cerebro*; Javier Grande: *Los anillos de un supersaturno*; José Óscar Hernández Sendín: *Arsénico en el agua y ¿Quién debe financiar la investigación básica?*; Alberto Ramos: *Ecuaciones elegantes*; Fabio Teixidó: *La falacia de la captura de carbono*; Pere Molera: *El arte de destilar*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España